

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KEV – Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**VELKÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY (PARKY) – NOVÉ
ZPŮSOBY PŘENOSU ELEKTRICKÉ ENERGIE**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek LANG**
Osobní číslo: **E14B0030P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Velké větrné elektrárny (parky) - nové způsoby přenosu elektrické energie**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bakalářská práce "Velké větrné elektrárny (parky) - nové způsoby přenosu elektrické energie" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte základní popis problematiky přenosu elektrické energie z těchto velkých větrných elektráren (parků) a na konkrétních případech ukažte způsoby jeho provedení.
2. Popište technologie přenosu HVDC.
3. Zpracujte v návaznosti informace k technologii Power-to-gas.
4. Zhodnoťte a uveďte další technologické možnosti.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P,Q u zdrojů.
3. Dle uvážení a pokynů udá vedoucí BP.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena z počátku na konstrukci větrných elektráren (parků). Poté je řešena jejich nadměrná výroba elektrické energie a s tím spojený problematický přenos, který se musí regulovat tak, aby nedocházelo k narušení bezpečného chodu elektrizační soustavy. Jedním z řešení je použití technologie HVDC. Další variantou je akumulace přebytečné elektrické energie a hlavním představitelem je technologie Power-to-gas. V závěru práce jsou však shrnuty i další akumulační metody, které se od sebe liší účinností, typem akumulačního média, akumulační kapacitou a dalšími vlastnostmi.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, větrný park, elektrická energie, onshore, offshore, přenosová soustava, distribuční soustava, elektrizační soustava, Power-to-gas, akumulace

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the beginning of the construction of wind power plants (parks). Afterwards, excessive production of electric energy is solved as well as problematic transmission, which must be regulated so as not to disturb the safe service of the power system. One solution is use HVDC technology. Another option is the accumulation of surplus electricity, of which power-to-gas technology is a best example. At the end of the thesis, other accumulation methods are described, which differ from each other by their efficiency, the type of storage media, the storage capacity and other properties.

Key words

Wind power plant, wind park, electricity, onshore, offshore, transmission system, distribution system, electricity system, power-to-gas, accumulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Marek Lang

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod	9
Seznam symbolů a zkratek	10
Větrné elektrárny	11
1.1 ZAVEDENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	11
1.2 VZNIK VĚTRU	11
1.3 KONSTRUKCE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	13
1.3.1 Základ	13
1.3.2 Věž	15
1.3.3 Gondola	15
1.3.4 Turbína	15
1.4 GENERÁTOR	18
1.4.1 Asynchronní generátor	18
1.4.2 Synchronní generátor	18
1.5 PŘEVODOVKA	19
1.6 REGULACE VÝKONU	20
1.7 ROZDĚLENÍ PODLE VELIKOSTI VTE	23
1.8 VĚTRNÉ PARKY	24
1.9 INSTALACE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN VE SVĚTĚ	25
2 Popis problematiky přenosu elektrické energie z velkých větrných elektráren (parků)	27
2.1 ELEKTRICKÁ ENERGIE Z VĚTRNÝCH PARKŮ ZE SEVERU EVROPY	27
2.2 ŘÍZENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	30
2.2.1 Řízení činného výkonu	30
2.2.2 Řízení jalového výkonu	31
3 Technologie HVDC	37
3.1 HISTORIE	37
3.2 VÝHODY A NEVÝHODY HVDC	38
3.3 SLOŽENÍ HVDC	39
3.4 KONFIGURACE DC SÍTÍ	40
3.5 TYPY TECHNOLOGIÍ HVDC	42
3.6 VEDENÍ HVDC	42
3.6.1 Propojení Evropských zemí	42
3.6.2 Propojení severu a jihu Německa	43
3.7 NEJVĚTŠÍ PŘENOS HVDC	44
4 Technologie Power – to – gas	45
4.1 PRINCIP	45
4.2 TYPY ELEKTROLÝZ	46
4.3 PŘEMĚNA ENERGIE	47
4.4 VODÍK	47
4.5 METAN	49
4.5.1 Výroba metanu	49
4.5.2 Uskladnění metanu	50
4.5.3 Přeměna zemního plynu na elektrickou energii	50
4.5.4 Převoz metanu	51

5	Další technologické možnosti akumulace	52
5.1	PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY	52
5.2	SETRVAČNÍKOVÉ AKUMULÁTORY	53
5.3	GRAVITAČNÍ ÚLOŽIŠTĚ.....	53
5.4	SUPRAVODIVÉ INDUKČNÍ AKUMULÁTORY	54
5.5	AKUMULACE DO STLAČENÉHO VZDUCHU (CAES)	55
5.6	SODÍKOVÉ BATERIE	55
5.7	PRŮTOKOVÉ BATERIE	57
5.8	SUPERKONDENZÁTORY	57
	Závěr	58
	Seznam literatury a informačních zdrojů	60

Úvod

V druhé polovině 20. století si evropské země uvědomily nebezpečí růstu emisí vznikající spalováním fosilních paliv a jejich omezeného množství. Začaly tudíž s vývojem obnovitelných zdrojů a jednou z jejich možností je i instalace větrných elektráren. Výhodou větrných elektráren je využití obnovitelné energie větru, který má na pevnině největší účinky v horských oblastech. Na moři jsou ale tyto účinky ještě větší, takže se moře jeví jako ideální místo pro stavbu jednotlivých elektráren či celých parků. Elektrárny tam nejsou omezeny výškou ani rozlohou, což má za následek výrobu velkého množství energie. V Evropě se staví větrné elektrárny či parky nejvíce na severu Německa. Je to dáno plánem, který si Německo dalo do roku 2030, aby vyrábělo 30 % elektrické energie obnovitelnými zdroji a větrná energetika je pro ně nejvhodnějším řešením. Plán zahrnuje i odstávku jaderných elektráren do roku 2022. Několik z nich je na jihu již odstaveno, tudíž je potřeba pokrýt jejich předešlou výrobu, a k tomu je vhodné využít energii vytvořenou na severu.

Problémem je, že výkon na severu narostl velmi rychle (v řádech GW), ale kapacita vedení v Evropě se příliš nezměnila. Tudíž v době větrna dochází k výrobě velkého množství energie, na které nejsou německá vedení dimenzovaná. Energie ale teče vedením cestou nejmenšího odporu, tedy i přes území České republiky a Polska, které rovněž nemají vedení dimenzovaná na takové výkony a dochází tedy k narušení bezpečného chodu elektrizační soustavy. Západní strana Německa tímto problémem netrpí, jelikož jsou Holandsko, Belgie i Francii chráněny speciálními transformátory.

Problémy s přetoky je potřeba řešit a jednou z variant je výstavba HVDC vedení, které je jednodušší a dokáže přenést mnohem větší výkony než dosavadní střídavé vedení. Tím by se mohla energie přenést přímo ze severu na jih nebo do jiných zemí (například do Norska), ve kterých by se spotřebovala.

Dalším řešením je využití akumulace přebytků elektrické energie. K tomu by mohly sloužit již ověřené metody, které uchovávají energii pomocí různých přeměn do různých medií (plyn, vzduch, voda, teplo a další). Podle typu akumulace by médium mohlo uchovávat energii na hodiny, dny, týdny, dokonce až měsíce a v době potřeby by se z něho elektrická nebo jiná energie získala zpět.

Seznam symbolů a zkratk

Onshore.....	Na pevnině
Offshore	Mimo pevninu
ES	Elektrizační soustava
PS.....	Přenosová soustava
DS	Distribuční soustava
SRN	Spolková republika Německo
ČR.....	Česká republika
PL	Polsko
PST	Phase Sifting Transformers
HVDC.....	High voltage direct current
AC.....	Alternating current
DC.....	Direct current
UHVDC	Ultra high voltage direct current

Větrné elektrárny

1.1 Zavedení větrných elektráren

Energie větru byla využívána už v dávných dobách. První záznamy jsou už z Egypta cca 3. století před Kristem, dále z Persie a Číny. V Evropě se začala energie větru využívat u větrných mlýnů okolo 11. století. Tyto mlýny byly použity na mletí obilí, čerpání vody a na zpracování dřeva.

První zmínka o využití větrné energie pro výrobu elektrické energie je z roku 1888, kdy Charles Brush postavil první větrnou turbínu, která dodávala elektřinu do jeho domova. Ale jelikož došlo k rozvoji parních strojů, větrné stroje se přestaly využívat. Znovu zavedení větrných elektráren, které už dodávají elektrickou energii do elektrizační sítě, je celkem mladá technologie. Její počátek je v 70. letech 20. století. V této době si průmyslové mocnosti uvědomily nebezpečí ekologické krize ohledně emisí vznikajících spalováním fosilních paliv. Důvodem bylo i zdražení kapalných paliv. Všechny tyto negativní vlivy vznikají hlavně při výrobě elektřiny a tepla.

Proto se v té době začalo v Evropě s výstavbou větrných elektráren, a to hlavně v Dánsku a Západním Německu. V České republice se začalo s využíváním větrné energie pomocí větrných elektráren v 90. letech. Z důvodu špatných větrných podmínek se postavilo jen pár kusů elektráren. Postupně se větrné elektrárny začaly stavět po celém světě. [1] [2] [47]

1.2 Vznik větru

Vznik větru je spojen s působením Slunce na planetu Zemi tím, že jí ohřívá. Ohřev Země ale není rovnoměrný. Ovlivňuje ho jak rotace Země, tak i střídání dne a noci, a tudíž vznikají v atmosféře tlakové rozdíly, které se snaží vyrovnat pomocí proudění vzduchu => vítr. Vlivem rotace Země není proudění vzduchu přímočaré, spíše to připomíná pohyb po spirále.

Větrné elektrárny využívají pouze horizontální složku větru pomocí rotoru (pohyblivá část generátoru), který se skládá z lopatek, do nichž se vítr opírá a tím je roztáčí. Tím, že se rotor točí, tak generátor transformuje mechanickou energii na elektrickou. To jak velkou

elektrickou energii je možno z elektrárny odebrat, záleží na výkonu, který lze odebrat z větru pomocí rotoru. [1] [2] [47]

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1)$$

$$P_A = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2)$$

$$P_T = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S \cdot \eta \quad (3)$$

P_V = energie větru (W)

P_A = maximální výkon, který může turbína vytvořit z energie větru (W)

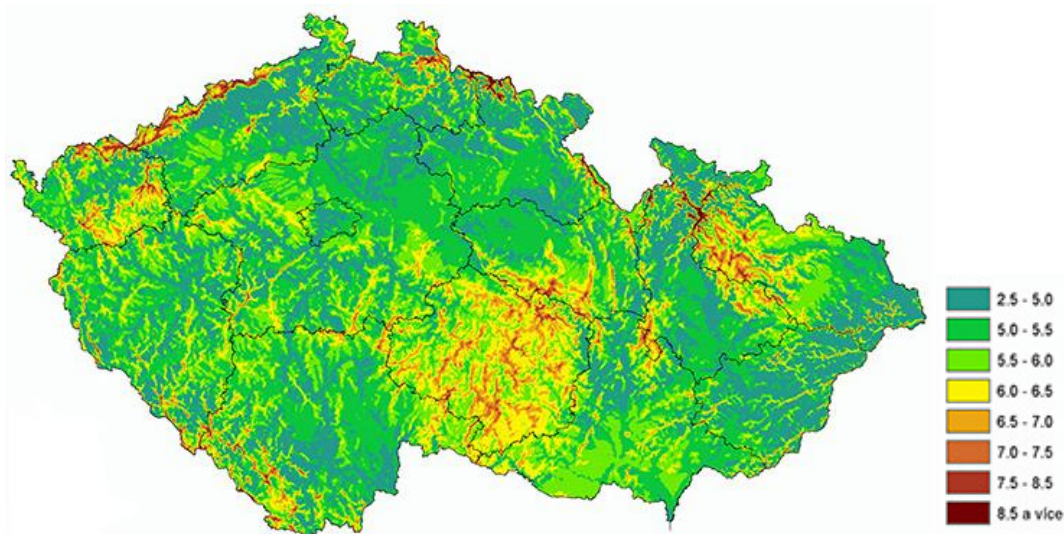
P_T = výkon turbíny, záleží též na ploše rotující vrtule a účinnosti zařízení (W)

(ρ = hustota vzduchu (kg/m^3); v = rychlost větru (m/s); S = plocha rotující vrtule (m^2);

η = účinnost zařízení (-) [47]

Rozsah výkonů je od 200 W až po 8 MW (tyto hodnoty jsou aktuální v době tvorby bakalářské práce).

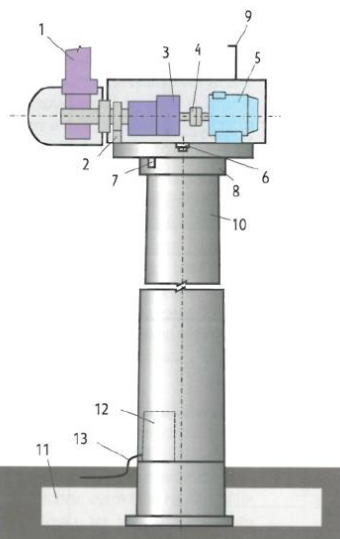
Ze vztahu plyne, že výkon je nejvíce závislý na rychlosti větru, která roste směrem od zemského povrchu. Rychlost pro roztočení turbíny je od 2-3,5 m/s, jmenovitá rychlost okolo 12-16 m/s a pro zastavení 22-28 m/s. V České republice jsou jmenovité rychlosti jen na málo místech a to většinou v horských oblastech. Zároveň kvůli chráněným a obydleným oblastem je vhodných míst pro větrné elektrárny ještě méně. [47] [48]



1.1. Průměrné rychlosti větru v ČR [48]

1.3 Konstrukce větrných elektráren

Základní části VTE – základ, věž, gondola, turbína



1.2. Rozložení větrné elektrárny [1]

Dílčí rozdělení:

- 1) Větrný motor s rotorovou hlavou; 2) Brzda motoru; 3) Převodovka; 4) Spojka;
- 5) Generátor; 6) Servopohon pro natáčení strojovny; 7) Brzda strojovny; 8) Ložiska;
- 9) Senzor pro snímání rychlosti a směru větru (anemometr); 10) Věž (tubus) elektrárny;
- 11) Betonový základ; 12) Elektrorozvaděče silnoproudého zařízení a řídicího obvodu;
- 13) Elektrická přípojka [1]

1.3.1 Základ

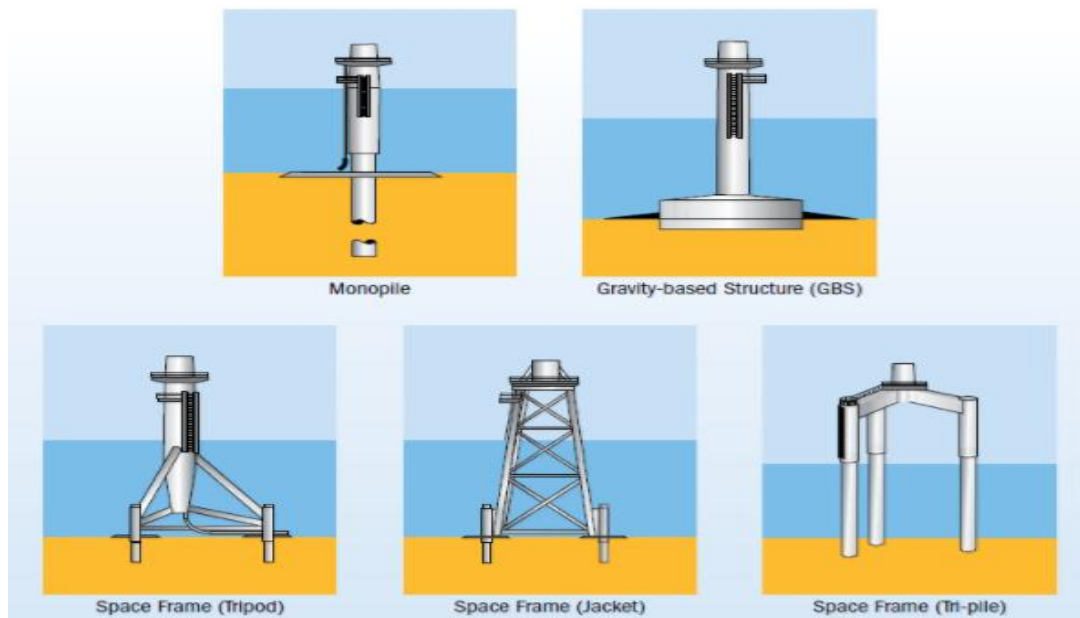
Větrná elektrárna typu onshore (na pevnině) má základ tvořen betonovou deskou (čím větší větrná elektrárna, tím větší základ). Pro představu větrná elektrárna o výšce 75 m má rozměry základu cca 10x10x5 m, záleží samozřejmě také na podloží. V betonovém základu je ukotvena pata věže. [4]



1.3. Betonový základ onshore větrné elektrárny [4]

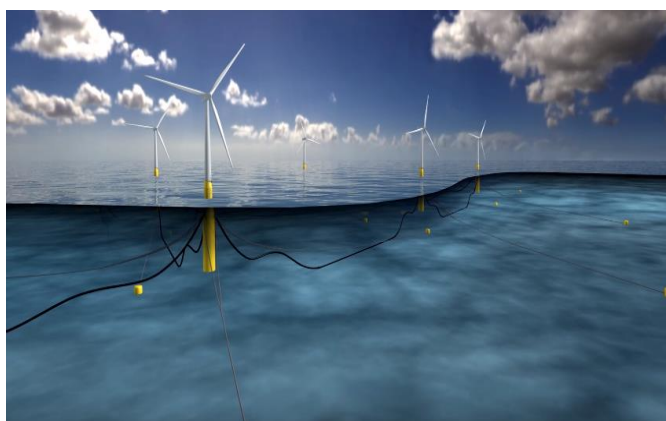
Větrná elektrárna typu offshore (mimo pevninu) má ukotvení pod hladinou moře. Typ ukotvení záleží na hloubce, podkladu a na síle proudů. V nejmenší hloubce do 10 m se

elektrárny nekotví, pouze stojí za pomoci podstavy a gravitace (Gravity-based Structure). V hloubce do 20 m se kotví způsobem Monopile, kde je už část zapuštěna do dna. Nad 20 m hloubky jsou využity způsoby Tripod, Jacket a Tripile, ty jsou složeny z ocelové konstrukce nebo pilířů.



1.4. Kotvení offshore elektráren do hloubky 50 m [4]

V hloubkách nad 50 m nelze už použít předchozí metody ukotvení, jelikož by to bylo neefektivní a nerealizovatelné. Proto se využívá plovoucích elektráren (jsou to tzv. Deep offshore), které jsou připevněny ke dnu pomocí lan. V tubusu, který je pod hladinou, je několikatonová zátěž, která slouží k vyvážení, aby nedošlo k rozhoupání, například při nárazu vln. [4] [16] [17]



1.5. Kotvení plovoucích elektráren v hloubce nad 50 m [17]

1.3.2 Věž

Věž je dutá a musí mít určitou výšku, aby byl rotor v dostatečné výšce nad přízemními větrnými turbulencemi a zároveň ve výšce, kde je dostatečně silný vítr. Věž musí mít dostatečnou pevnost na udržení gondoly s turbínou a také velkou odolnost vůči síle větru. Slouží pro přístup do gondoly buď po žebříku, schodech nebo výtahem. Zároveň tudy vede elektrické vedení od generátoru. V patě věže je měnič, přípojná svorkovnice, vstupní dveře a další zařízení. Věž je zkonstruována buď z oceli (u malých VTE), železobetonu, nebo příhradové konstrukce složené z krátkých nosníků (u velkých VTE jsou nosníky potažené sklolaminátem kvůli lepší povětrnostní ochraně). [3] [4] [49]

1.3.3 Gondola

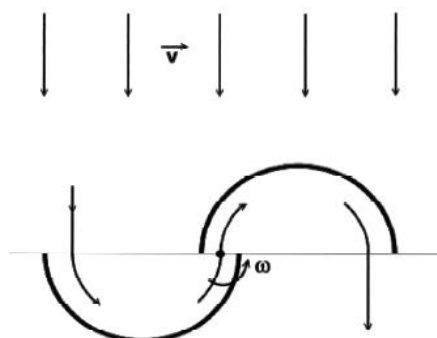
Obsahuje tato zařízení: generátor, spojka, převodovka, hřídel, ložiska, hydraulická kotoučová brzda, servopohony, náboj turbíny a také dostatečný prostor na jejich obsluhu. Servopohony a ložiska jsou tam pro natáčení gondoly. Přístup do gondoly je jak pomocí žebříku či výtahu z věže, tak i z vnějšku odklopením střešního poklopu gondoly. Využitím jeřábu lze tímto poklopem vkládat či vyjímat zařízení. Na gondole je senzor (anemometr) pro snímání rychlosti a směru větru, podle kterého se ovládají servopohony pro otáčení lopatek rotoru, či celé gondoly, aby se energie větru využila na roztočení rotoru v maximálním rozsahu. Anemometr zároveň řídí spuštění rotoru při minimální rychlosti nebo zabrzdění rotoru při dosažení maximální povolené rychlosti (při větší rychlosti než je maximální povolená by mohlo dojít k destrukci). [1] [4]

1.3.4 Turbína

Je složená z náboje a lopatek (listů), které jsou k náboji připevněné. V náboji mohou být servomotory, které jsou řízené elektronikou přijímající signály z anemometru pro natáčení lopatek. Na tyto lopatky působí vítr, který lopatkami otáčí a vytváří tím mechanický pohyb rotoru. Turbínu lze vytvořit s libovolným počtem lopatek, ale nejlepší se ukázalo využití 3 lopatek, což je nejmenší počet, který je ještě dynamicky lehce ovladatelný a zároveň má nižší kmitavě dynamické problémy než turbíny s menším počtem lopatek. Dalšími výhodami jsou malá hlučnost, díky malé obvodové rychlosti lopatek, a optická tichost chodu, díky které obyvatelé větrné elektrárny více akceptují. Z těchto důvodů jsou tyto turbíny využity v 95 % větrných elektráren. Lopatky mají speciální tvar a pracují na principu buď odporové nebo vztlakové síly. Dále se dělí podle osy otáčení na horizontální a vertikální, nebo podle rychlostního součinitele na pomaloběžné a rychloběžné. [1]

- **Odporové turbíny**

Patří mezi nejstarší motory. Jejich využití je velmi nízké a to kvůli své malé účinnosti 15-23 %. Mohou mít jak svislou, tak i vodorovnou osu otáčení. Rotační pohyb je vytvořen působením větru na plochu, která mu vytváří aerodynamický odpor. Aby vznikl hnací krouticí moment, musí být rychlost větru větší než rychlost otáčení turbíny a toho se docílí tím, že se bude odebírat energie z motoru. Plocha turbíny je takového tvaru, že nezávisí na směru působení větru. Tvar vyduté polokoule klade proti větru 3,5 krát větší odpor než vypouklá polokoule. Typickým příkladem tohoto typu je Savoniův motor.



1.6. Savoniův motor [1]

Výhody:

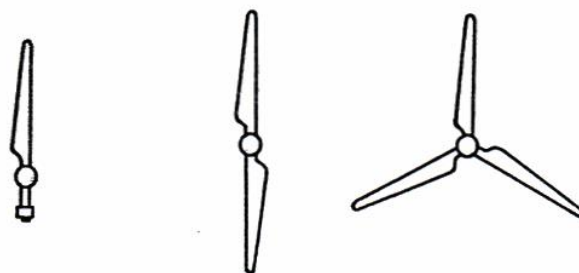
- Jednoduchá konstrukce.
- Není závislý na směru působení větru.
- Velký rozsah rychlosti větru – otáčí se již při rychlosti 2 m/s.
- Přímý přenos krouticího momentu.

Nevýhody:

- Malá rychloběžnost.
- Malá účinnost (lze získat malý výkon z energie větru).
- Vysoký točivý moment. [1]

- **Vztlakové turbíny**

Vztlakové turbíny mají vodorovnou i svislou osu otáčení. S vodorovnou osou směřují turbíny kolmo na směr větru. Konstruuji se rychloběžné turbíny s 1 až 4 lopatkami (listy), ale nejčastěji jsou tvořeny s 2 nebo 3 lopatkami.



1.7. Vztlaková turbína s různým počtem listů [1]

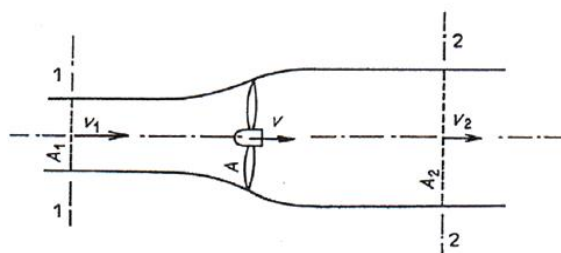
Tyto turbíny vytvářejí mechanickou práci rotoru z kinetické energie větru tím, že zpomalují proud vzduchu (vítr), který protéká skrz turbínu, kde se odnímá část energie větru díky lopatkám. V prostoru, který omezuje turbína, se změní protékající energie a tento stav, lze vyjádřit rovnicí kontinuity:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

v = rychlost větru (m/s); A = plocha (m²)

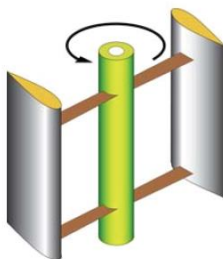
Rovnice popisuje to, že stav před turbínou (vysoká rychlost větru „ v_1 “ působící na malou plochu „ A_1 “) je stejný jako stav na turbíně (rychlost větru „ v “ působící na plochu turbíny „ A “) i jako stav za turbínou (nízká rychlost větru „ v_2 “ působícího na velkou plochu „ A_2 “).

Z toho důvodu musí být dostatečný rozestup větrných elektráren, aby se působením turbíny neovlivňovaly.



1.8. Ovlivnění větru turbínou [1]

Na principu rotoru se svislou osou otáčení pracuje například motor Darrieus, který lze zkonstruovat s 2-4 lopatkami.



1.9. Darrieus motor [1]

Výhody:

- Jsou rychloběžné.
- Velká účinnost (využití energie větru) přes 40 %.
- Konce lopatek dosahují 2-10 krát větší rychlost než je rychlost větru.
- Nízká hmotnost.

Nevýhody:

- Horší rozběh při nízké rychlosti větru (k rozběhu dochází od 5 m/s).

[1]

1.4 Generátor

Toto zařízení přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Přejít mezi těmito energiemi je s účinností 90 – 98 %. K převodu slouží u větrných elektráren generátor buď asynchronní, nebo synchronní. Generátor je umístěn za turbínou v gondole (tento princip se realizuje nejčastěji, i když je vrchní část elektrárny mnohem těžší, a tudíž musí být věž robustnější), nebo je hnací síla od turbíny vedena pomocí hřídele skrz věž až dolů ke generátoru (tento princip se moc nevyužívá z důvodu nákladného a složitého přenosu mechanické síly). [1] [3]

1.4.1 Asynchronní generátor

U malých a středních výkonů (do 300 kW) se využívá asynchronní generátor s kotvou nakrátko s použitím soft startéru nebo přepínačem pólů. Výhodou je jednoduchý rozběh a velká spolehlivost, která je dána celkově jednodušší konstrukcí a s tím spojená i snazší údržba. Nevýhodou je malý rozsah otáček a kvůli tomu je i menší účinnost při malých rychlostech větru a nežádoucí přechodové děje.

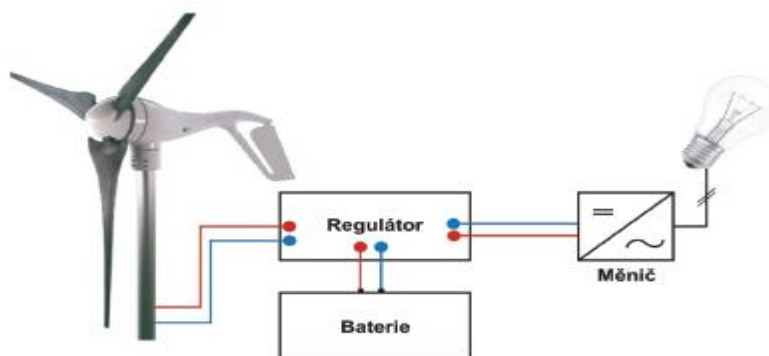
U velkých výkonů se též využívá asynchronní motor, ale s napájeným rotorem. Díky tomu má větší rozsah otáček, a tak lze vyrábět elektrickou energii i při nižších otáčkách. Pokud spojíme rotorové vinutí tzv. nakrátko nebo do rotoru přidáme přídavné odpory, tak to zvýší rozsah skluzu, a tudíž se nemusí napájet rotor. [1] [3]

1.4.2 Synchronní generátor

Má větší účinnost. K síti se může připojit buď přes střídač, nebo i přímo, ale i tak potřebuje nákladnou regulační techniku, která provede synchronizaci se sítí. Synchronní generátor převádí energii, pouze pokud turbína dosáhne synchronních otáček. Aby se

převáděla i při jiných otáčkách, musí se výstupní elektrická energie usměrnit a poté následně převést na střídavý signál pomocí střídače.

- 1) Má využití u malých elektráren. Je zde použitý jako vícepólový s permanentními magnety a většinou je doplněný o usměrňovač a baterie, do které akumuluje energii. Pokud neobsahuje usměrňovač ale střídač, tak lze pomocí něj napájet jednodušší 1f spotřebiče.



1.10. Zapojení malé elektrárny [1]

- 2) Využívá se též u velkých elektráren s vysokým výkonem. Nyní jsou hojně provozovány s frekvenčním měničem místo převodovky. Výhodou je, že v gondole není rozměrná převodovka, která měla i velkou hmotnost. Kvůli absenci převodovky se snížila hmotnost celé gondoly ale místo toho je v gondole robustnější generátor s frekvenčním měničem, který řídí regulaci generátoru a díky tomu může motor pracovat s větším rozsahem otáček. [1] [3]

1.5 Převodovka

Převodovka větrných elektráren převádí nízkou rychlost turbíny na vysokou rychlost rotoru generátoru či naopak. Má velké rozměry a je velice namáhána rázy od rotoru, a proto jsou navrhovány s vysokým bezpečnostním koeficientem. Velký problém býval s hlasitostí převodovky a z toho důvodu se začala ozubená kola vytvářet kalením, cementováním nebo nitridováním s následným broušením.

Převodovky mají převodní poměry podle výstupního výkonu generátoru. Jsou dva typy převodovek: s čelním převodem se šikmými zuby a planetové. Planetové se více zahřívají a z toho důvodu se nepoužívají u malých výkonů (do 50 kW při převodním poměru 1:12 – 1:25), protože by se spotřebovalo mnoho z vytvořené energie kvůli

ventilátoru. U velkých výkonů (jednotky MW při převodním poměru 1:70 – 1:200) se používají několikastupňové planetové převodovky nebo kombinované několika stupňové převodovky, které využívají jak stupně planetové (první stupně), tak i koaxiální (poslední 1 až 2 stupně).

Větrné elektrárny se vyrábí i bez převodovek. Hlavním výrobcem elektráren bez převodovek je společnost Enercon. Vyrábět větrné elektrárny s převodovkou nebo bez převodovky má své výhody i nevýhody. Pokud není převodovka použita, tak se v gondole uvolní mnoho místa, a jelikož není použita ani spojka, či spojovací zařízení, tak se usnadní i údržba a je méně rotujících částí. Místo toho je použit vícepólový generátor, který má mnohem větší rozměry, tudíž mohou nastat problémy při transportu. Vícepólový generátor k sobě potřebuje frekvenční měnič. [2] [3] [4]

1.6 Regulace výkonu

Po větrných elektrárnách chceme, aby co nejlevněji vytvářely elektrickou energii. K tomu dospějeme tím, že budou produkovat maximální výkon již při menší, než je jejich maximální povolená rychlost otáčení. Jmenovitá rychlost (rychlost, při které dochází k maximální výrobě energie) se dosahuje většinou při rychlostech od 12-16 m/s. S většími jmenovitými rychlostmi než jsou tyto, se nevyplácí větrné elektrárny stavět, jelikož je výskyt těchto vyšších rychlostí větru minimální. Regulaci využíváme pro maximální využití větru a tím dosažení jmenovité rychlosti turbíny, zároveň k udržení na této hodnotě, dále ke snížení otáčení turbíny při velkých rychlostech větru, aby nedošlo k poškození, a nakonec slouží ke snížení výroby výkonu, pokud je potřeba ho snížit.

Metody regulace výkonu:

Velké elektrárny:

- „Pitch“ systém = Regulace pomocí naklápění (změna úhlu) lopatek.
- „Stall“ systém = Regulace odtržením proudu.
- „Aktivní Stall“ regulace.
- „Stall – Pitch“ a „Pitch – Stall“ regulace.

Malé elektrárny

- Otáčení celého rotoru.

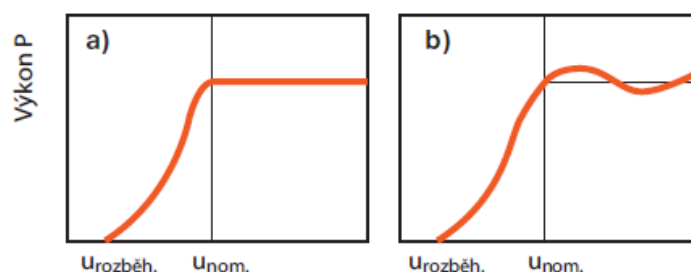
Regulace Pitch

Je to elektronický regulátor, který sleduje produkovaný výkon a podle něho otáčí lopatky kolem jejich osy. Pokud se výkon zvyšuje nad jmenovitou hodnotu, sníží ho pomocí naklonění lopatek (zvýší úhel naklonění), aby vytvářely menší aerodynamický odpor na působící vítr. Pokud se pro změnu rychlost větru sníží natolik, že výkon klesne pod jmenovitou hodnotu, natočí se lopatky tak, aby vytvářely větru větší aerodynamický odpor a tím roztáčely turbínu na větší rychlost, aby se dosáhlo co největšího výkonu. Pitch systém slouží pro získání maximálního výkonu, ale zároveň i pro ochranu zařízení při vysokých rychlostech větru. Výhodou je přesná regulace výkonu. Nevýhodou je složitý a drahý náboj turbíny, ve kterém se zajišťuje naklápění lopatek.

Regulace Stall

Tento systém má lopatky napevno, tudíž nelze s nimi otáčet po jejich ose. Ale tyto lopatky mají aerodynamický profil, kde se využívá toho, že při vyšších rychlostech větru než jsou vhodné, se vytvářejí na odvrácené straně lopatky turbulence. Při tomto jevu dochází k odtržení proudu vzduchu, a tudíž i ke zpomalení turbíny.

Výhodou je, že turbína nemá složitý naklápěcí systém a tím je i jednodušší údržba. Nevýhodou ale je, že musí obsahovat lopatky s profilem, který má vysoké nároky na aerodynamiku. U tohoto systému může být navíc i problém s případnými vibracemi vyvolanými odtržením proudu. Dalším problémem je nastavení lopatek, které se provádí až na místě po zkušebních testech. A poslední nevýhoda je v tom, že se turbína sama nerozběhne, je k tomu potřeba elektromotor. Proto se turbíny s touto regulací využívají většinou jen u větrných elektráren s výkonem do 1 MW.



1.11. a) Regulace Pitch; b) Regulace Stall [2]

Aktivní regulace Stall

U této regulace se využívá jak naklápění lopatek (Pitch), tak i odtržení proudu (Stall).

Princip: když je turbína v klidu (nevyrábí se elektrická energie) jsou lopatky ve směru proudu vzduchu, pokud dochází k rozběhu, začnou se lopatky naklápět do směru proudu. Poté se lopatky naklápí stále více (zvyšují úhel) do směru proudu, až se bude vyrábět jmenovitý výkon. Jestliže by rychlost větru stoupala, tak v tomto okamžiku by se při regulaci Pitch začly lopatky naklápět ještě více (zvyšovaly by úhel), ale u Aktivní Stall regulace se naklopí zpět (snižují úhel) a začne docházet k odtržení proudu vzduchu, čímž dojde k odrážení přebytečné energie větru.

Výhoda oproti pasivní Stall je v přesnější regulaci výkonu, takže nedochází k přetěžování generátoru, když jsou vysoké rychlosti větru. Při zvyšujících se rychlostech dochází k výrobě stále jmenovitého výkonu, což u pasivní regulace Stall nelze, protože u ní odtržení proudu vzduchu způsobí větší pokles výkonu, než je potřeba. Aktivní regulace Stall se využívá hlavně u velkých větrných elektráren (od 1 MW). Oproti regulaci Pitch má výhodu v menší citlivosti na znečištění náběžných hran lopatek.

Regulace Stall – Pitch

Turbíny musí mít jak schopnost otáčení lopatek (Pitch), tak i tvar lopatek pro regulaci Stall. Při rozběhu se využívá regulace Pitch. Při vyšších rychlostech se přejde k regulaci Stall, jelikož u ní nedochází k přetížení listů. Pokud jsou ještě vyšší rychlosti (nad jmenovité), využívá se i regulace Pitch, při níž se přiklápěním lopatek plynule udržuje maximální výkon.

Výhodou je jednodušší a stabilnější udržování maximálního výkonu. Nevýhodou je vyšší hlučnost a větší ohyb lopatek.

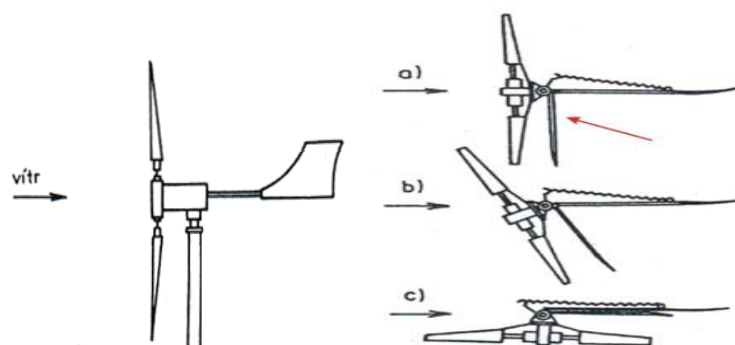
Regulace Pitch – Stall

Regulace Pitch se zde využívá jak pro rozběh, tak i při zvýšených otáčkách, kdy dochází naklápěním lopatek k omezení výkonu. Až když jsou otáčky velmi vysoké (nad jmenovité), dochází k přechodu na regulaci Stall.

Výhodou je menší hlučnost a snížený ohyb lopatek. Nevýhodou jsou vyšší nároky na rychlost regulace než u regulace Stall – Pitch.

Regulace u malých VTE

Pro maximální využití větru se u starších malých větrných elektráren využívá natáčení celého rotoru do směru větru. Pro otáčení se používá směrové kormidlo. Do tohoto kormidla se opírá vítr a otáčí ho, dokud není ve směru větru. Pokud je velká rychlost větru a mohlo by dojít k poškození zařízení, tak dojde k odstavení, při kterém se osa rotoru nastaví kolmo vůči působení větru (rotor směřuje dolů).



1.12. a) Běžný provoz turbíny; b) Naklopení turbíny při silném větru [1]

Novější malé větrné elektrárny (do 1,5 kW) se konstruují jako rychloběžné. U nich se využívá brzdění pomocí pomaluběžných generátorů s usměrňovačem a nemají převodovku. [1] [2] [3]

1.7 Rozdělení podle velikosti VTE

Malé VTE

Jedná se o větrné elektrárny do výkonu 10 kW. Mikro zdroje, s výkonem do 2 - 2,5 kW, mají turbínu o průměru 0,5 – 3 m, pracují na ostrovním režimu (nedodávají elektrickou energii do sítě) s výstupním napětím 12 - 24 V a slouží hlavně k dobíjení akumulátorů, ze kterých se akumulovaná energie využívá pro napájení elektrických spotřebičů (lednička, radiostanice, navigace, osvětlení atd.). Tyto větrné elektrárny mají velké využití na námořních lodích.

Elektrárny s výkonem od 2,5 do 10 kW mají turbínu o průměru 3 – 8 m a jejich výstupní napětí je 48 – 230 V. Slouží hlavně pro napájení rodinných domů, chalup a hospodářských statků, které nemají přístup k elektrické síti. Tam, kde mají přístup k elektrické energii, není ekonomické tyto elektrárny stavět. [2]

Střední a velké VTE

Střední větrné elektrárny mají turbínu s průměrem 16 – 45 m o výkonu 60 – 750 kW. Tyto elektrárny nemají tak velké využití jako velké větrné elektrárny o výkonu 750 – 6400 kW s turbínou o průměru 45 – 128 m. Největší využití onshore elektráren je s výkonem od 1500 – 3000 kW. S větším výkonem jsou vhodné jen u offshore, kde je dostatečně silný vítr. [2]

1.8 Větrné parky

Větrné parky (farmy) jsou tvořeny soustředěním větrných elektráren. Elektrárny se musí stavět s dostatečným odstupem, aby se neovlivňovaly. U velkých větrných parků se dává odstup až 15 násobku průměru rotoru elektrárny.

Z důvodu neustálého vývoje větrných elektráren, hlavně jejich růstu do výšky, delším listům a tudíž i většímu plošnému pokrytí rotoru, dochází k mnoha problémům. Na pevnině (onshore) je problém hlavně s dopravou dlouhých listů a jejich nadměrné hmotnosti. Dováží se lodí po moři a následně po kanálech či řekách, kde problém není zas tak velký, ale poté je potřeba součásti dopravit na místo stavby, která je někdy i stovky kilometrů daleko a často v horských oblastech nebo v místech, kde se musí cesta i dostavět.

Míst vhodných pro umístění větrných elektráren na pevnině ubývá, a proto se začalo využívat pro stavbu větrných elektráren moře, kde není problém jak s dopravou, hlukem a dalšími ekologickými hledisky, jako například ničením krajiny vyčnívající větrnou elektrárnou či větrným parkem. Výhodou jsou zároveň lepší větrné podmínky a neomezený prostor. Nevýhodou je potřeba specializovaných firem a lodí, které jsou určeny pro stavbu v různých hloubkách moře, dále pro dopravu dílů a nakonec pro servis. [16]

Lodě pro stavbu (*obr. 1.13.a*) větrných elektráren mají vytažovací nohy, které se opřou o dno, aby byly stabilní a mohly jak ukotvovat pilíře či konstrukce do dna, tak i stavět pomocí jeřábu. Lodě, které se využívají pro stavbu větrných elektráren, jsou většinou původně konstruovány pro stavbu ropných věží. Proto se společnost Siemens zaměřila na tento problém a začala s výrobou lodí pro dopravu součástí a pro servis. Pro dopravu Siemens vytvořilo loď *Rotra Vente (obr. 1.13.b)*, která dokáže převést několik

větrných elektráren rozdělených na díly. Dále Siemens pro servis větrných elektráren vytvořilo loď (obr. 1.13.c), která obsahuje vysunovací plošinu pro spojení s elektrárnou. Dokáže být velmi stabilní i při velkém vlnobití a má i dobrou manévrovatelnost. Dále má výhodu v rychlém přesunu k elektrárně, a to rychlostí 14 uzlů (26 km/h), díky které tyto dvě lodě za první rok používání provedly servis za pomoci lávky na 7400 elektrárnách. [18, 19]

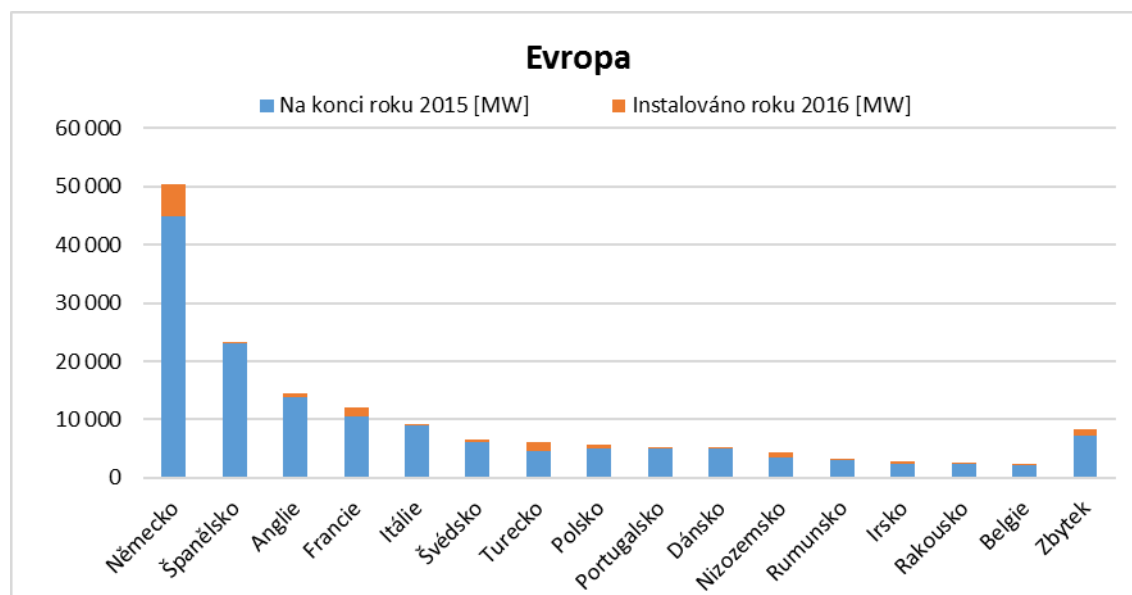
Jelikož jsou na stavbu potřeba jak tyto speciální lodě, tak i jejich posádka, je výstavba offshore větrných elektráren několikanásobně nákladnější.

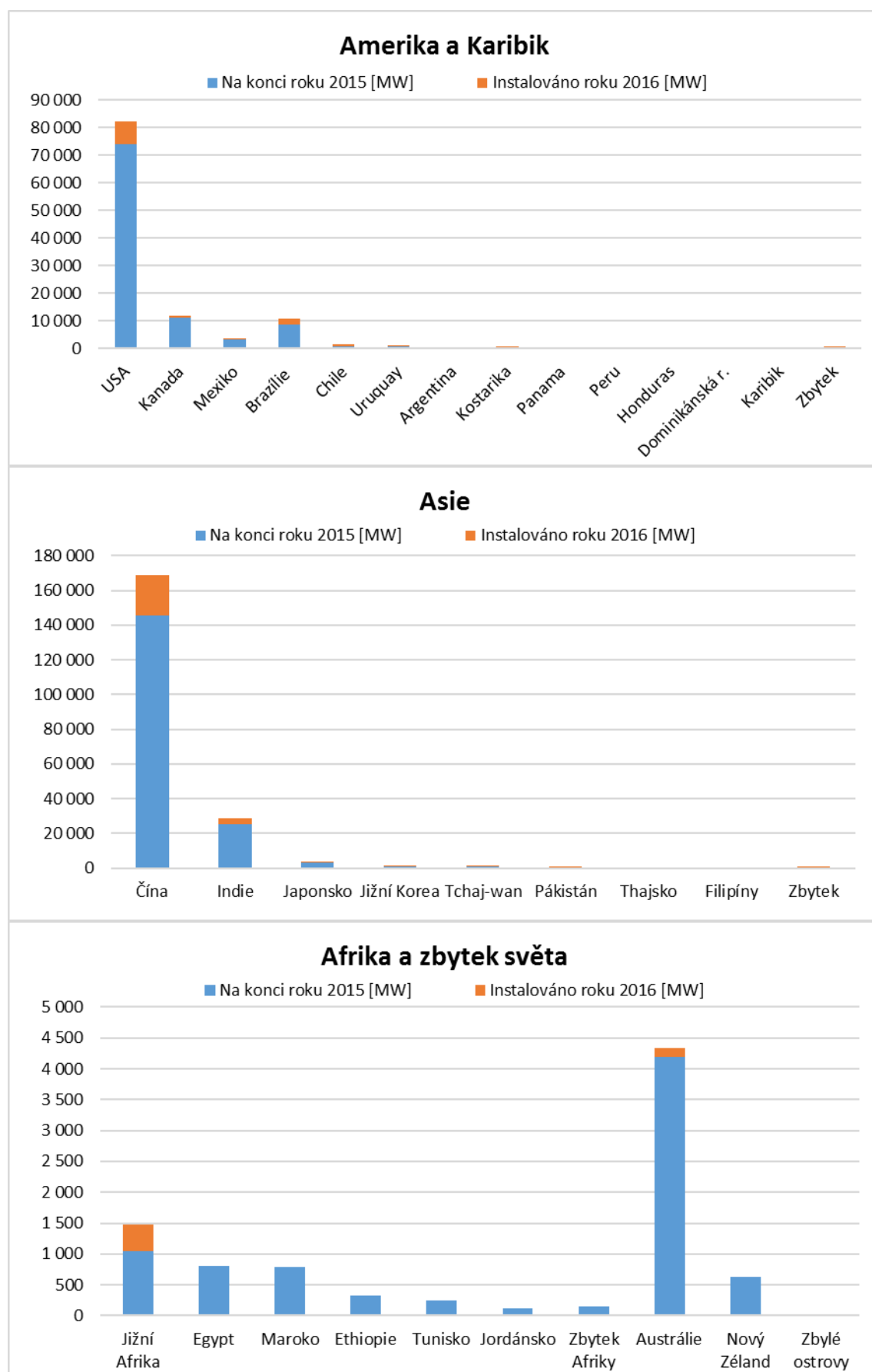


1.13. Lodě pro stavbu, dopravu a servis offshore větrných elektráren [16, 18, 19]

1.9 Instalace větrných elektráren ve světě

Každý rok přibývá instalovaných větrných elektráren a zejména větrných parků. V posledních letech převážně v Číně a v USA, které převzaly nadvládu v instalovaných výkonech nad Německem, které sice i nadále staví, ale s Čínou se nemůže už srovnávat. V grafech jsou modře znázorněny instalované výkony do konce 2015 a oranžově znázorněny nově instalované výkony v roce 2016.





1.14. Instalace výkonů větrnými elektrárnami ve světě [24]

2 Popis problematiky přenosu elektrické energie z velkých větrných elektráren (parků)

Výhodou obnovitelných zdrojů oproti konvenčním je nevyčerpatelné množství energie z těchto zdrojů. Nevýhodou ale je u větrných a slunečních elektráren proměnná výroba energie, která je závislá na větru a slunci, které nelze korigovat. Proměnná výroba se projeví kolísáním napětí a frekvence, které nepříznivě působí na přenosovou a distribuční síť. Jediná možnost jak snížit dopad těchto proměnných faktorů na elektrizační soustavu (dále jen ES), je nutnost jejich regulace. [11]

2.1 Elektrická energie z větrných parků ze severu Evropy

Problémem je, že na severu Evropy a to hlavně na severu Německa (dále jen SRN) narůstá množství větrných farem onshore a zejména offshore. Roste tedy množství vytvořené elektrické energie a na to nejsou přenosové soustavy (dále jen PS) dimenzovány. Větrné parky se stavějí i přesto, že jsou PS přetížené a tudíž dochází k problémům. S tímto problémem zápasí Polsko (dále jen PL) i Česká republika (dále jen ČR), přes které teče velké množství SRN energie. Je to způsobeno tím, že elektrická energie teče cestou nejmenšího odporu, tudíž nepoteče ze severu přímo na jih SRN s Rakouskem, kde jsou vedení už přetížená (a kudy by měla energie původně téci), ale přes vedení, která nejsou tak zatížená tedy přes ČR a PL.

Velký problém by mohl nastat při toku velkých výkonů, pokud by do jednoho z vedení například zasáhl blesk, což by ho vyřadilo z činnosti. Došlo by tedy k přesunu energie na další vedení, to by se také přetížilo, takže by se přelil na další a další vedení a tím by došlo k tzv. blackoutu v celé zemi. [11]

Řešení problému velkého toku energie

SRN sice už začalo se stavbou přenosové sítě směrem na jih, ale jelikož to ještě pár let potrvá a výstavba větrných parků je velmi rychlá, byla by PS PL a ČR ještě více zatížena. Další možností je výměna vodičů za větší průměry, či přidání dalších vedení na stožár, ale je problém s tím, že by se linka v době rekonstrukce musela odstavit a to si nemohou provozovatelé PS dovolit a také nemusí být stožáry dimenzované na zvýšenou zátěž. Aby bylo řešení efektivní, finančně a časově realizovatelné, tak z tohoto důvodu se rozhodl polský provozovatel PS, český ČEPS a německý 50Hertz (jeden z německých

poskytovatelů PS) zainvestovat do PST (Phase Sifting Transformers) transformátorů, které budou na hranicích se SRN stejně jako je tomu na hranicích SRN s Belgií a Holandskem řídit příchozí tok výkonů v síti. Na hranicích ČR a SRN jsou dvě vedení 400kV a na každém z nich bude dvojice PST transformátorů zapojené paralelně. První dva z plánovaných čtyř transformátorů jsou v provozu od ledna 2017 v rozvodně Hradec u Kadaně a zbylé dva se plánují v polovině roku. V SRN budou pouze 2 tyto transformátory v rozvodně Röhrsdorf. [11]

Dispečerů budou díky těmto PST transformátorům moci regulovat a udržovat elektrickou energii v bezpečných mezích. Pomocí transformátoru lze měnit buď amplitudu nebo úhel pootočení napětí. Pokud by se měnila amplituda, tak při nezatíženém vedením by se měnil převážně jen jalový výkon, ale na vedení je problém s přetoky činného výkonu, tudíž je potřeba měnit úhel. V transformátorech dojde k přidáním fázově posunutého regulačního napětí ke vstupnímu napětí, čímž dojde k výslednému fázovému posunu napětí. Transformátor tudíž dokáže činný výkon snižovat, zvyšovat a přerozdělovat ho mezi dílčí vedení tak, aby veškerý činný výkon netekl pouze jedním vedením a nedošlo k jeho přetížení. Transformátor v ČR je vhodný pro výkony až 850 MVA, dokáže regulovat úhel o $\alpha \pm 30^\circ$ a obsahuje 65 poloh odboček. [5]



2.1. PST Transformátor [5]

Řešení přebytků energie

Přebytky energie ze SRN větrných elektráren se využívají v Rakousku pomocí přečerpávacích elektráren. Pomocí této energie přečerpávají vodu do nádrží. Za tuto energii, jelikož je přebytečná, platí velmi nízkou cenu (cena může být i záporná) a za vedení, kterým energie teče (PL, ČR) neplatí téměř nic. Když nefouká a tedy větrné

elektrárny nevyrábí elektřinu, prodávají rakouští provozovatelé přečerpávacích elektráren elektrickou energii zpět do SRN jako regulační a za mnohem větší peníze, což se německým občanům nelíbí.

Pro ČR a PL by bylo vhodné využívat tyto přebytky, jelikož jsou za velmi nízkou cenu, nebo by jim dokonce za odběr i SRN platilo. Jenže tyto země nemají čím tyto přebytky odebrat a zároveň technologie pro akumulaci energie jsou teprve ve vývoji (viz kapitola 4 a 5). [5] [11]

Propojení s Norskem

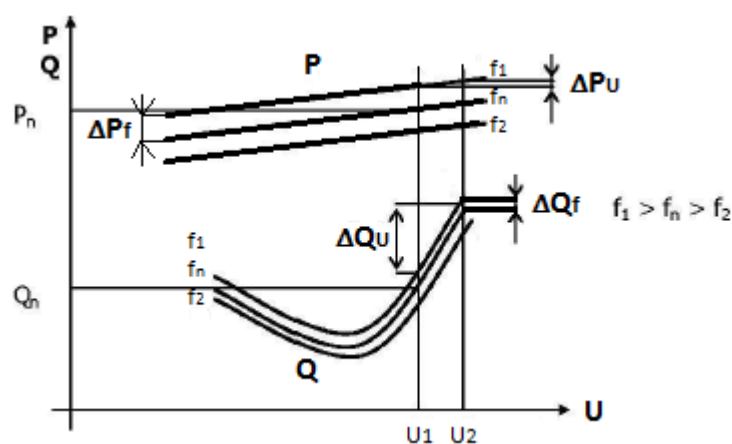
Norsko spolupracuje se Švédskem a Finskem kvůli přenosu energie, takto spolupracuje i s Holandskem a Dánskem, ale s nimi už je propojeno podmořským kabelem. Této spolupráce se snaží docílit i SRN s Anglií odkud už probíhá výstavba podmořského kabelu do Norska. Propojení se Skotskem se zatím plánuje. Toto spojení je hlavně kvůli přebytkům energie z OZE (SRN hlavně z větrných parků), která by se mohla akumulovat v Norsku. Nebude se využívat přebytků pomocí přečerpávacích elektráren, jelikož jich Norsko moc nemá (sice je většina jejich výroby cca 95% elektrické energie z vodních elektráren, ale z toho je naprostá většina z klasických akumulčních elektráren a z přečerpávacích jen nepatrné množství cca 1%), ale tak že jí budou využívat běžní spotřebitelé, aby Norsko využilo levnou energii z větrných parků nebo fotovoltaiky. V době, kdy nebude foukat, bude Norsko vyrábět více energie, než potřebuje a přebytky bude posílat zase zpět z vodních elektráren.

Jenže v Norsku mají problém s přehradami, u kterých musí být stálý alespoň minimální průtok vody kvůli rybám, tudíž je nemohou úplně odpojit v době větrna. Dalším problémem jsou normy pro minimální hladinu vody v přehradě při využívání těchto elektráren jako zdroj elektrické energie. Naopak při nevyužívání vodních elektráren, ale větrných nebo fotovoltaických je problémem maximální hladina vody při velkých srážkách. [6]

2.2 Řízení elektrizační soustavy

ES se skládá z paralelního spojení elektráren, přenosových sítí, rozvodných sítí a spotřebitelů. Provozovatelé se v ní snaží udržet spolehlivou a kvalitní dodávku elektrické energie. Velmi jim to komplikuje frekvence, což je globální parametr (je stejný v celé ES) a napětí, což je lokální parametr (napětí v jednom uzlu je jiné než v druhém uzlu).

PS se zabývá jak dodávkou činného a jalového výkonu od výroby, tak i jejich přenosem směrem ke spotřebiteli. Z charakteristiky je vidět, že činný výkon se změní více při změně frekvence ΔP_f než při změně napětí ΔP_U a jalový výkon se více změní při změně napětí ΔQ_U než při změně frekvence ΔQ_f . [7] [8]



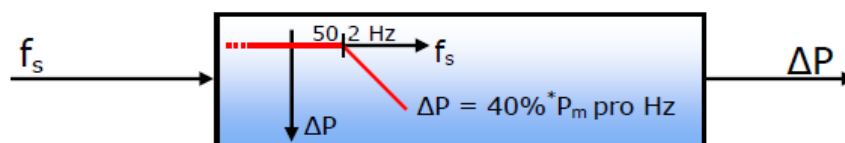
2.2. Závislost činného a jalového výkonu [8]

2.2.1 Řízení činného výkonu

Všechny výroby dodávající energii do sítě musí být schopny činný výkon automaticky regulovat podle velikosti frekvence v síti, podle poměrů v síti nebo podle nařízení dispečinku. Řízení činného výkonu u větrných elektráren je dáno regulací lopatek turbíny (viz kapitola 1.6 Regulace výkonu), které ovlivňují rychlost otáčení turbíny a tím i vyráběný výkon. Aby nedošlo k přetížení přenosových sítí vlivem přítoku velkého množství energie ze SRN, reguluje se činný výkon na hranicích země pomocí již zmiňovaných PST transformátorů.

Změna činného výkonu v závislosti na frekvenci

Pokud se frekvence sítě zvýšila nad 50,2 Hz, tak všechny výrobní, které se ze sítě neodpojily, musí snížit dodávaný činný výkon.



2.3. Regulace frekvence [9]

$$\Delta P = 20P_m \frac{50,2\text{Hz} - f_s}{50\text{Hz}} \quad (5)$$

P_m = okamžitý výkon (W); ΔP = snížení výkonu (W); f_s = frekvence sítě (Hz)

V rozsahu od 47,5 do 50,2 Hz (provozní stav) – výrobní mohou pracovat bez omezení. Při frekvenci nižší než 47,5 Hz a vyšší než 51,5 Hz dochází k odpojení výrobní od sítě. Výrobní zůstanou odpojeny, dokud se frekvence nevrátí zpět do provozního stavu (47,5 - 50,2 Hz), poté se mohou připojit a postupně navyšovat činný výkon.

Provozovatel distribuční soustavy (dále jen DS) může nařídít snížení činného výkonu nebo odpojení výrobní od sítě v případě:

- Potenciální ohrožení bezpečnosti provozu systému.
- Nutné provozní práce popř. nebezpečí přetížení v síti.
- Nebezpečí vzniku ostrovního provozu.
- Ohrožení statické nebo dynamické stability.
- Vzrůst frekvence ohrožující systém.
- Údržba nebo provádění stavebních prací. [9]

2.2.2 Řízení jalového výkonu

Velké změny v ES nastaly v posledních pár letech vlivem velkého rozmachu OZE (hlavně větrných farem) a narůstající kabelizace soustav. Tyto zásahy do ES ovlivňují doposud osvědčené dispečerské metody.

Provozovatel PS a DS musí řídit protékající jalový výkon, aby soustavou protékal jen takový jalový výkon, který je potřeba pro správný chod a uřídit ho, není jednoduché.

2.2.2.1 Možnosti řízení

Provozovatel soustavy má několik možností jak řídit regulaci jalového výkonu.

- 1) Zadaná hodnota generátorového napětí.
- 2) Zadaná hodnota jalového výkonu.
- 3) Zadaná hodnota účinníku.
- 4) Zadaná hodnota napětí v pilotním uzlu. [10] [12]

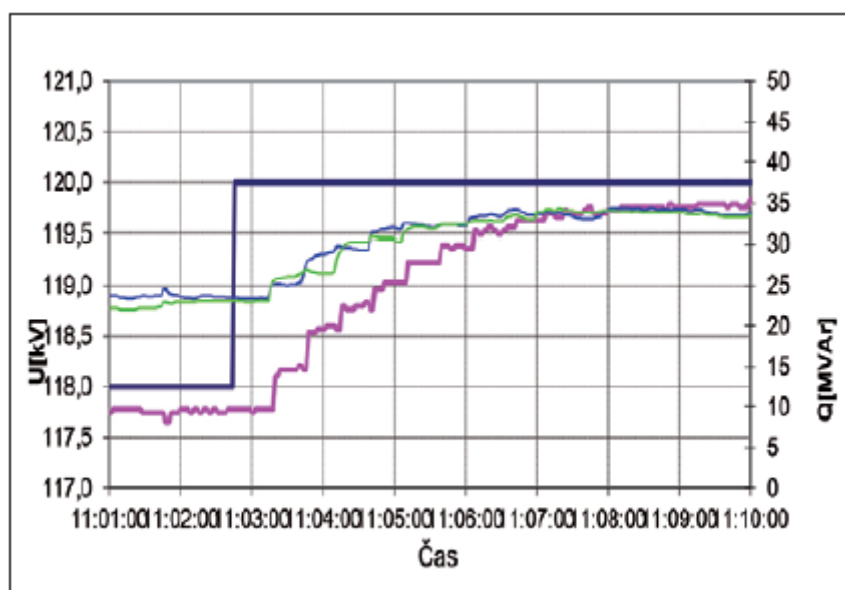
1) Zadaná hodnota generátorového napětí (Řízení jalového výkonu synchronního generátoru)

Každý generátor povinně obsahuje možnost jeho dálkové změny napětí. [10] [12]

1.1) Primárním regulátorem napětí (PRN)

Pokud je zadaný povel na změnu velikosti generátorového napětí, tak PRN změní v generátoru tvorbu jalového výkonu. Dojde k tomu velmi rychle. Jak moc se změní výroba jalového výkonu, záleží na velikosti vyslaného změnového impulzu a rychlost změny odpovídá dQ/dt .

Na obr. 8 je znázorněna změna dodávky jalového výkonu od dvou synchronních generátorů (zelená a světle modrá barva) a měřené napětí (fialová barva) z důvodu změny žádaného napětí (tmavě modrá barva).



2.4. Regulace napětí a jalových výkonů [12]

1.2) Změna odbočky blokového transformátoru

U této metody nedochází ke změně regulace na generátoru. Generátor zde není nijak ovlivňován. Ke změně dochází mezi generátorem (výrobní soustava) a PS či DS v transformátoru, kde dojde ke změně odbočky. Tím dojde ke změně napětí na PS či DS. Nevýhody oproti předchozí metodě jsou:

- Dojde ke skokové změně jalového výkonu (u PRN dochází k plynulé změně).
- Transformátor chápe tuto změnu jako poruchu a snaží se jí eliminovat.
- Změna napětí proběhne pouze odhadem (PRN by tuto změnu přesně spočítal).
- Při změně odbočky dochází k opotřebení transformátoru.
- Musí se dobře promyslet přepnutí odboček, jelikož při větším množství přepnutí by mohlo dojít k poškození transformátoru a následnému odstavení.

Metoda PRN a změna odboček nelze kombinovat, jelikož by tyto metody šly proti sobě.

Možnosti 1) Zadání hodnoty generátorového napětí vyhovuje primární regulace napětí (PRN), ale možnosti 2), 3) a 4) potřebují ještě nastavbu PRN. [12]

2) Zadaná hodnota jalového výkonu

O změnu dodávky jalového výkonu se stará zařízení nazývané sekundární regulátor jalového výkonu (SRQ). Stará se o konstantní dodávku jalového výkonu generátoru. Tato metoda se už nepoužívá z důvodu možnosti kolapsu soustavy, který by mohl nastat kvůli napěťové nestabilitě.

3) Zadaná hodnota účinníku

Regulátor se snaží udržovat účinník v daném rozsahu 0,95-1 při odběru elektrické energie ze soustavy. Udržováním účinníku se zajišťovalo, aby nedošlo k podpětí při odebírání jalového výkonu ze soustavy nebo zvyšování technických ztrát. Tato metoda fungovala velmi dobře v době, kdy v soustavě byl nedostatek jalového výkonu. Jenže vlivem OZE a kabelizace začíná být přebytek jalového výkonu, může tedy docházet často k přepětí v transformovných PS, a tudíž musí docházet ke kompenzaci pomocí výkonových tlumivek nebo k vypínání méně zatížených vedení. To snižuje provozní bezpečnost soustavy. Kvůli udržování účinníku bylo potřeba, aby se odebíral činný výkon pouze

s omezeným množstvím jalového výkonu, ale v některých bodech soustavy je to teď spíše naopak, je potřeba, aby se s činným výkonem odebíralo co nejvíce jalového výkonu a tím se v těchto bodech snížilo napětí. Využití má pouze u menších tepláren s napájením vlastní spotřeby ze soustavy.

4) Zadaná hodnota napětí v pilotním uzlu

Změna napětí generátoru je zajišťována zařízením nazývaným automatický sekundární regulátor napětí (ASRU). Zabývá se regulací jalového výkonu při zadaném napětí soustavou v pilotním uzlu. Toto je nejvhodnější metoda řízení. [10] [12]

Automatický sekundární regulátor napětí (ASRU)

Podle zadaného napětí zajišťuje ASRU vyrovnávání bilance jalového výkonu v určitých uzlech soustavy. Tyto uzly jsou nejdůležitější v soustavě, jelikož jsou tam převážně připojeny rozvodny velkých elektráren, které by nejvíce ovlivňovaly soustavu, a tudíž je ideální vyrovnávat napětí pomocí řízeného jalového výkonu těchto elektráren na zvolenou hodnotu, kterou zvolí provozovatel soustavy. A proto se tyto uzly nazývají pilotní.

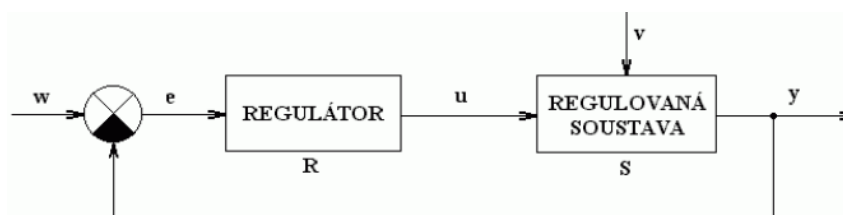
Závislost mezi napětím jednoho uzlu a jalovým výkonem v jiném uzlu lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (6)$$

ΔU_i = změna napětí v uzlu „i“ (V); a_{ij} = koeficient citlivosti změny napětí v uzlu „i“ na změnu jalového výkonu v uzlu „j“ (-); ΔQ_j = změna jalového výkonu v uzlu „j“ (VAr).

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud je vysoký koeficient, tak menší elektrárna může být pro regulaci napětí vhodnější než velká elektrárna při nízkém koeficientu.

Regulace napětí a jalového výkonu v pilotním uzlu je nejefektivnější a nejbezpečnější, jelikož se nemusí sledovat napěťové poměry v blízkých uzlech. Pokud by se regulovalo napětí hned u výroby za transformátorem, tak by regulace nebyla stabilní a efektivní. A pokud v uzlu přímo u většího odběratele, byla by regulace složitá kvůli velkému množství omezovacích podmínek.



2.5. Blokové schéma regulace se zápornou zpětnou vazbou [14]

w = žádaná veličina; y = regulovaná veličina; e = regulační odchylka; u = akční veličina; v = poruchová veličina; R = regulátor (funkce systému ASRU); S = regulovaná soustava

Největší rozdíl ASRU oproti řízení účinníku je ten, že pracuje jako regulátor se zpětnou vazbou, tudíž stále porovnává žádanou a regulovanou veličinu a dochází tedy k regulaci napětí (regulace obsahuje toleranční pásmo, ve kterém se musí napětí pohybovat např. soustava 110 kV \pm 0,5 kV). ASRU pouze reguluje napětí podle zadané hodnoty, ale už nedokáže posoudit, jestli je žádané napětí pro soustavu vhodné, proto je hodnota žádaného napětí nastavena buď pevně, nebo jí lze změnit ručně či programově.

Pro regulaci napětí slouží řízení jalového výkonu, který je odebírán ze synchronních generátorů elektráren nebo třeba z tepláren, které tento výkon produkují jako vedlejší, jelikož je tvořen zároveň s činným výkonem. Protože nelze vyrábět činný výkon bez jalového, tak je vyráběn zadarmo a tudíž ideální pro regulaci, jelikož externě vyráběný jalový výkon pomocí statických, rotačních kompenzačních zařízení či výkonových tlumivek vyjde mnohem dražde.

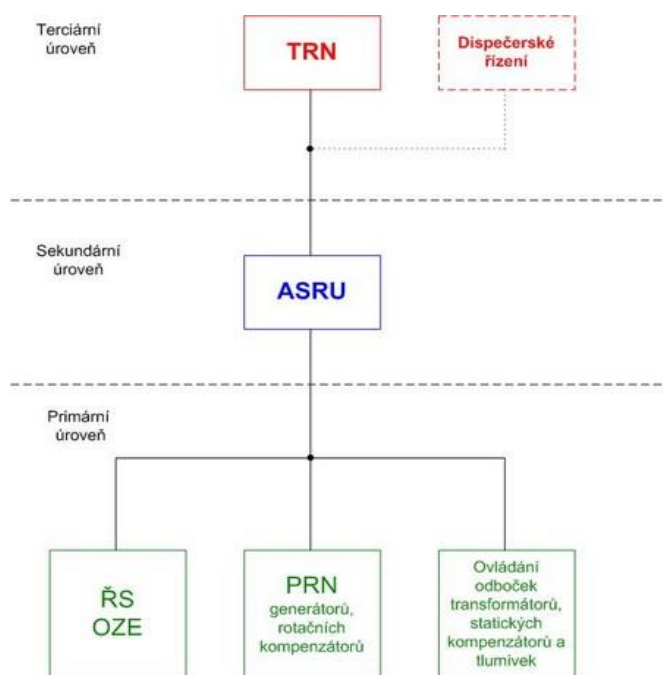
Pokud je připojen větrný park k soustavě, je brán jalový výkon ze všech generátorů. Jelikož každý generátor může vyrábět jiný výkon, tak je odebírání jalového výkonu tvořeno poměrově, tudíž k vyčerpání regulační rezervy dojde u všech generátorů zároveň, aby nedocházelo k přetahování jalového výkonu mezi generátory.

Využíváním přebytku jalového výkonu k regulaci napětí a snižování technických ztrát se zároveň snižuje počet přepínání mezi odbočkami u transformátorů jak vlastníků výroben, tak i PS či DS. [14]

Systém regulace napětí a jalových výkonů

ES využívá určitou posloupnost v regulaci napětí a jalových výkonů. Je složena z terciární, sekundární a primární úrovně.

- **Terciární (TRN)** – Je na úrovni regulované soustavy. Slouží pro nahrazení vyčerpané sekundární regulační zálohy. Je s ním propojeno dispečerské řízení, což je systém, který provádí výpočet chodu sítě a tím určuje jak rozložení jalového výkonu v regulované soustavě, tak i velikost zadaného napětí v pilotních uzlech pro bezpečný a ekonomický provoz elektrizační soustavy.
- **Sekundární (ASRU)** – Pomocí jalového výkonu z připojených generátorů (akčních členů) k síti reguluje žádané napětí od TRN v pilotním uzlu.
- **Primární (PRN)** – Je na úrovni s generátory a řídí jejich tvorbu jalového výkonu podle zadaného napětí na jejich výstupu. [14]



2.6. Struktura systému regulace napětí a jalových výkonů [14]

3 Technologie HVDC

Většina přenosu elektrické energie je tvořena pomocí střídavého napětí, ale stejnosměrný přenos také vidáme např. u trakce. Jelikož je v energetice v posledních několika letech velký rozmach obnovitelných zdrojů a zejména ve vodním, fotovoltaickém a větrném odvětví a místa jejich spotřeby jsou stovky někdy až tisíce kilometrů daleko, je potřeba mezi výrobou a spotřebou elektrickou energii přenášet. Elektrickou energii potřebují například i velké doly nebo ropné plošiny, které jsou na otevřeném moři, tudíž i tam je vhodné použít stejnosměrné vedení. Dále se staví i nová velmi dlouhá vedení kvůli většinou už přetíženým stávajícím vedením, které jsou v provozu už desítky let a nebyly dimenzované na tak velký přenos z důvodu neustálé stavby nových elektráren (parků). Vedením se propojují i různé země kvůli výměnám elektrické energie. [15]

3.1 Historie

První využití stejnosměrného proudu bylo v roce 1800 ale jen pro vědecké účely. První vytvořený generátor s komutátorem (základ dnešních dynam) byl postaven roku 1831. Modernější dynamo už využívalo elektromagnetické buzení. Díky tomuto buzení bylo umožněno vytvářet mnohem výkonnější generátory, což umožnilo zavedení elektřiny do průmyslové výroby a později i využití v městském osvětlení.

Velkou nevýhodou stejnosměrného proudu bylo to, že se nedala snadno měnit velikost napětí a muselo se tedy pracovat jen s velikostí napětí, které udával generátor. Generátor vyráběl jen nízké napětí, a tudíž byl problém s přenosem proudu na větší vzdálenosti, kde docházelo k velkému poklesu napětí a k vysokým ztrátám. Z tohoto důvodu se od této chvíle začalo pracovat se střídavým proudem.

Střídavý proud se začal masivně využívat až po vynalezení transformátoru, poté vícefázového motoru (vynálezcem byl Nikola Tesla) a nakonec díky schopnosti přenášet elektrický proud na velké vzdálenosti pomocí tří fázové soustavy, což nastalo roku 1891.

Návrat ke stejnosměrnému proudu nastal ve 30. letech 20. století, když byl vynalezen rtuťový usměrňovač, který umožňoval jednodušeji než rotační měnič přeměnit vysoký střídavý proud na stejnosměrný. Roku 1967 byl vynalezen tyristorový měnič a v dnešní době jsou využívány měniče s IGBT tranzistory.

První dálkový přenos pomocí vysokého stejnosměrného napětí (HVDC) mezi švédským pobřežím a ostrovem Gotland nastal roku 1954. [15]

3.2 Výhody a nevýhody HVDC

Výhody

- Nevyužívá frekvenci a fázi, tudíž nemusí udržovat zdroje připojené do soustavy v synchronismu.
- K přenosu stačí pouze 1 vodič při zemním návratu (pomocí zemních elektrod), takže pokud dojde u 2 vodičového vedení, které má zemní návrat, u jednoho z nich k poruše, lze používat pro přenos pouze jeden vodič, ale bude se přenášet jen poloviční kapacita energie.
- Při přenosu energie jsou ztráty na vedení od určité vzdálenosti nižší než u AC, při přenosu na 1000 km pomocí HVDC jsou ztráty přibližně 3 %.
- Lze využít pro přenos jak nadzemní, podzemní, tak i podmořské vedení.
- Mezi 2 sousedními vodiči lze mít menší izolační vzdálenosti.
- Vedení se nemusí dimenzovat na maximální hodnoty.
- Střídavé vedení lze využít pro stejnosměrný přenos tak, že 2 vodiče se využijí pro přenos a 1 bude záložní, díky tomu bude větší spolehlivost přenosu.
- Lze kontrolovat směr a přenášený výkon.
- Není potřeba kompenzace jalového výkonu.
- Nedochozí ke skinefektu, tudíž lze přenášet energii vodiči s menším průřezem.
- Kabely pro HVDC jsou levnější.

Nevýhody

- Obtížná změna velikosti napětí.
- Drahá polovodičová technika v měnících.
- Vhodné pouze ke spojení 2 míst, pokud by se chtěla udělat odbočka, tak by se v místě odbočky musela postavit měnič.
- Vhodné pouze pro přenos na velké vzdálenosti, při menších vzdálenostech se velmi projeví ztráty na polovodičových součástkách v měnících. [15]

3.3 Složení HVDC

Stejnoseměrné vedení je složeno z měničny na začátku spojení (v režimu usměrňovače), měničny na konci spojení (v režimu střídače) a vedením, které je mezi měničkami. Měnična se skládá z měničových transformátorů, 12 pulzního měniče (tyristorový nebo tranzistorový IGBT), vyhlazovacích tlumivek, filtrů AC a DC proudu a nakonec ochran.

Měničový transformátor

Pomocí něho dochází k navýšení velikosti napětí. Do měniče je potřeba připojit dva 3f vstupy, které mají fázový rozdíl 30° nebo 150° , což je způsobeno zapojením transformátorů do Yy0 a Yd5.

Zároveň slouží jako galvanické oddělení AC a DC obvodu. Dále se transformátor využívá pro omezení zkratových proudů tím, že plní funkci reaktivní impedance v AC obvodu. Z důvodu vyššího namáhání izolace stejnosměrným napětím a průchodu vyšších harmonických složek proudu je potřeba, aby byl transformátor speciálně vytvořen pro účely HVDC.

Měnič (Usměrňovač / střídač)

Podle toho jaké polovodičové součástky používá, se dělí na LCC a VSC. Je složen ze dvou 6 pulzních můstkových měničů, které jsou zapojeny sériově.

LCC – Starší typ měniče, který využívá polovodičové součástky tyristory. Ty se vyznačují jednoduchým sepnutím, ale složitějším vypnutím, kdy se pro vypnutí musí použít opačná polarita napětí. Měniče se chovají jako proudové zdroje, proud tudíž teče pouze jedním směrem. Pokud chceme změnit směr toku výkonu, tak musíme změnit polaritu napětí v začáteční i koncové měničce.

VSC – Novější typ měniče, který používá IGBT tranzistory. Tyto součástky lze zapnout i vypnout bez potřeby změny polarity napětí. Zároveň je lze spínat s mnohem větší frekvencí, ale to se projeví ve vyšších ztrátách. Jelikož je možnost libovolného spínání a vypínání tranzistorů, tak tím lze řídit spotřebu jalového výkonu, který lze dodávat i do střídavé sítě. Měničny, které využívají jako polovodičové součástky IGBT tranzistory jsou polovičních rozměrů a z toho důvodu jsou vhodné pro výstavbu na moři.

Vyhlazovací tlumivky

Slouží k vyhlazení průběhu proudu. Pokud je vedení málo zatížené, tak tlumivky snižují výskyt přerušovaných proudů. Tím zamezují, aby došlo k poškození vedení, jelikož při přerušovaném proudu může vzniknout vysoké přepětí. Dále slouží ke snížení vlivu poruchových proudů, při určitých frekvencích zamezují výskyt rezonance a nakonec snižují rušení, jelikož jsou jako sériová impedance, tudíž potlačují vyšší harmonické složky.

Filtry

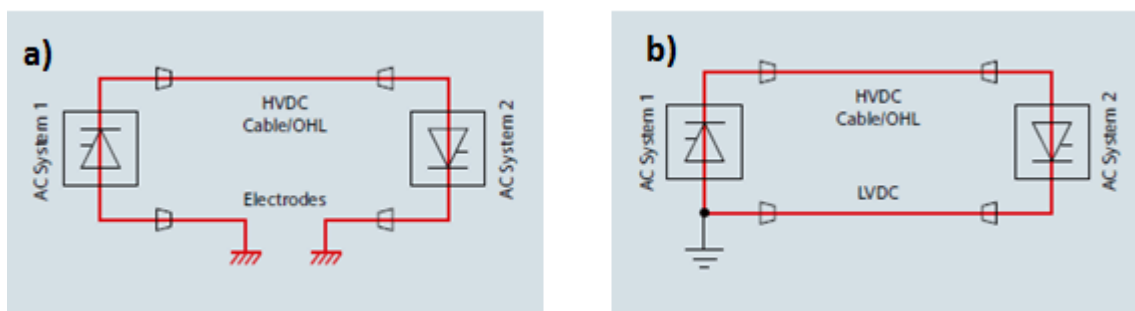
Jsou filtry střídavého a stejnosměrného proudu. Filtry stejnosměrného proudu odstraňují ze stejnosměrného vedení vyšší harmonické složky, které vedou k rušení. Filtry střídavého proudu odstraňují ze střídavého vedení vyšší harmonické, které vznikají v měničích. [15]

3.4 Konfigurace DC sítí

Velmi často používaná uspořádání vedení jsou jednopólová, dvoupólová a Back-to-back (vedení tzv. nulové délky). Dále jsou ještě víceterminálová, ale ty se používají výjimečně.

Jednopólové uspořádání (Monopolární technologie)

- Přenos mezi dvěma měnícími se provádí vodičem, ale pro zpětnou cestu slouží zemnicí elektrody, které využívají pro spojení zem nebo moře. Moře jako zpětná cesta se využívá u podmořských kabelů.
- Pokud není prostředí vhodné pro návrat pomocí zemnicích elektrod, je použit pro zpětnou cestu také vodič, což vyjde dražší a s většími ztrátami.

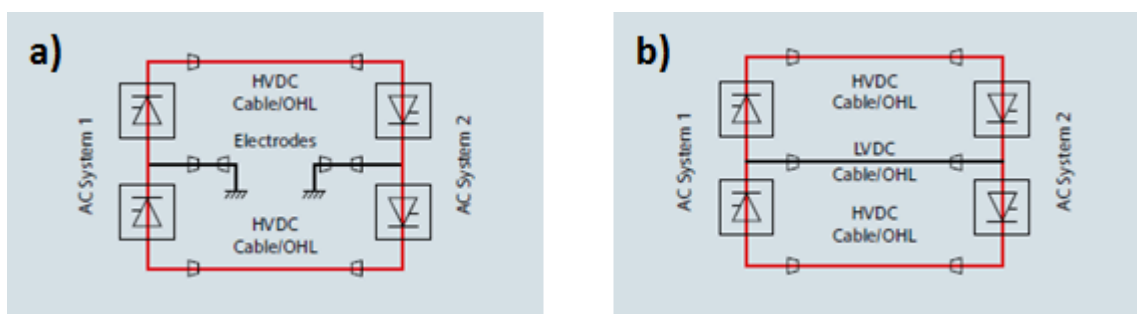


3.1. Jednopólové uspořádání: a) se zemním návratem; b) se zpětným vodičem [15]

Dvoupólové uspořádání (Bipolární technologie)

Jedná se o přenos mezi dvěma měničnými na každé straně. Jsou propojeny dvěma vodiči, které přenáší stejně velké napětí, ale s opačnou polaritou. Dále jsou propojeny pomocí dvou zemních elektrod nebo vodičem, kterým teče malý vyrovnávací proud. Na rozdíl od jedнопólového uspořádání je přenos spolehlivější a disponuje dvojnásobnou přenosovou kapacitou.

Dojde-li k poruše, lze využít druhý vodič pro zpětnou cestu, což zmenší přenosovou kapacitu na polovinu. Pokud by došlo k poruše na jednom z vodičů, lze opět provozovat vedení s poloviční přenosovou kapacitou, ale pro zpětnou cestu se využije zemní spojení nebo vodič, které jsou původně využity pro vyrovnávací proud.

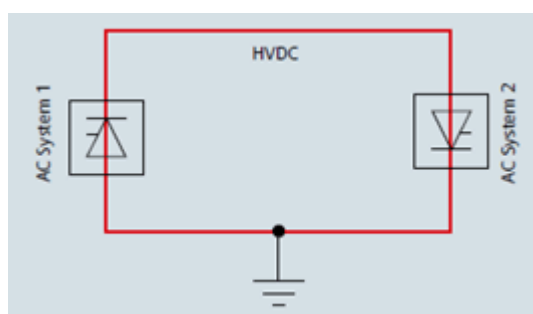


3.2. Dvoupólové uspořádání: a) se zemním návratem; b) se zpětným vodičem [15]

Back-to-back

Toto uspořádání obsahuje usměrňovač a střídač v jedné budově. Jeho funkce je propojení dvou nesynchronních střídavých soustav nebo k určení směru toku energie, jelikož to u normálních střídavých soustav nelze provést.

Tyto stanice využívají napětí o velikosti jen několik desítek kV. I když je vedení velmi krátké (desítky metrů), ale protéká jím velký proud, tak jsou ztráty nízké. [15]



3.3. Vedení nulové délky (Back-to-back) [15]

3.5 Typy technologií HVDC

Classic = Využívá se hlavně pro přenos velkých výkonů na dlouhé vzdálenosti podzemním, nadzemním nebo podmořským vedením. Lze přenést až 5 GW. [21]

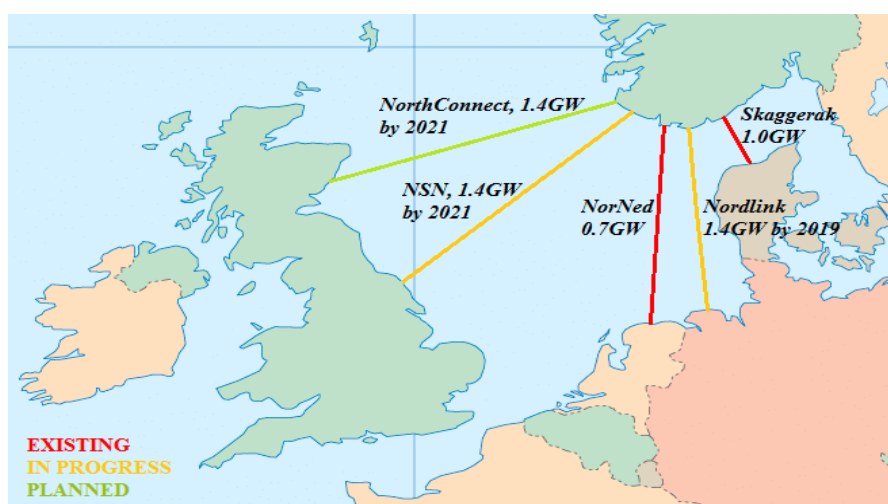
Light = ekologičtější verze, která je také schopna přenášet energii na velké vzdálenosti podzemním nebo podmořským vedením. Light se používají u přenosových sítí, ale převážně k připojení vzdálených zdrojů jako například solární a větrné parky nebo spotřebitelů, jako jsou ropné plošiny nebo velké doly. Jsou schopny přenášet až 3 GW. [20]

Ultra = Při ultra vysokém napětí lze přenášet i velmi vysoké výkony. Běžný je přenos 6 - 8 GW při napětí 800 kV, lze přenášet i na vzdálenost 1500 km. Tyto limity se neustále navyšují. [21]

3.6 Vedení HVDC

3.6.1 Propojení Evropských zemí

Z důvodu potřeby obousměrného přenosu elektrické energie v době přebytků a nedostatků energie je potřeba propojení některých zemí jako například Norska s jinými zeměmi jako je Německo, Dánsko, Anglie, Skotsko a Nizozemí využitím HVDC podmořských kabelů s technologií HVDC Classic a Light.



3.4. Propojení s Norskem podmořskými kabely [6]

3.6.2 Propojení severu a jihu Německa

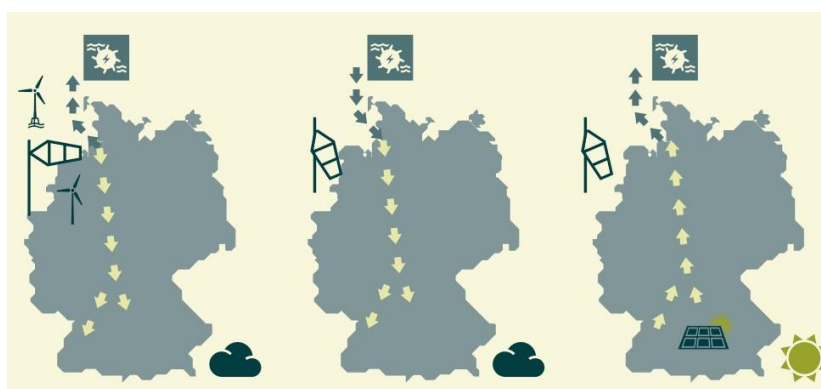
Toto spojení nazvané Suedlink je realizováno HVDC vedením, které má odlehčit ČR a PL od přetoků. Ale z důvodu odporu německé veřejnosti k nadzemnímu vedení se přešlo k návrhu provést část vedení jako podzemního, což výstavbu prodlouží o několik let, nejspíše až do roku 2025.

Spojení má elektrickou energii vytvořenou hlavně větrnými parky na severu přenášet na jih do průmyslových oblastí, kde by se většina vytvořené energie spotřebovala, hlavně po uzavření jaderných elektráren, což je v plánu roku 2022.

Z tohoto důvodu se začalo na jihu s výstavbou fotovoltaických parků a plynových elektráren, aby pokryly spotřebu.

Jsou tři plánované metody určené počasím, jak bude elektrická energie v SRN přenášena po postavení spojení Suedlink s využitím spojení Nordlink (spojení mezi Norskem a Německem).

- V době, kdy bude foukat vítr a bude zataženo, půjde část vytvořené elektrické energie z větrných parků přes Nordlink do Norska a část na jih Německa pomocí Suedlinku.
- Když nebude foukat a bude zataženo, bude se přenášet energie z Norska z vodních elektráren přes Nordlink do Německa a poté přes Suedlink.
- Pokud nebude foukat, ale bude slunečno, tak energie půjde z jihu pomocí Suedlinku na sever Německa a poté přes Nordlink do Norska. [22]



3.5. Směr toku elektrické energie vedením Suedlink podle počasí [22]

3.7 Největší přenos HVDC

V roce 2016 společnost ABB získala projekt v Číně, kde dojde k největšímu přenosu výkonů na nejdelsí vzdálenost po největší napěťové hladině UHVDC. Přenos bude probíhat ze severozápadní oblasti Sin-t'iang z Changji do Guquan ve východní provincii Anhui v Číně. Po UHVDC vedení na napěťové hladině 1100 kV se bude přenášet 12 GW na vzdálenost 3324 km. Spojení se staví pro přenos elektrické energie ze západní a severozápadní části Číny do východní části Číny. V západní a severozápadní části mají přebytky energie, zatímco ve východní vyrábějí energii z fosilních paliv, a tudíž jí chtějí nahradit pro snížení emisí. [23]

4 Technologie Power – to – gas

Důvod akumulace

V mnoha zemích dochází z důvodu výstavby obnovitelných zdrojů jako jsou fotovoltaické farmy a hlavně tedy větrné farmy v době větrna a slunečna k velkým tokům elektrické energie, což velmi zatěžuje ES a jen těžko se dají takto velké toky spotřebovat. V době, kdy nefouká nebo nesvítlí slunce, je zase nedostatek energie a musí se výroba dohánět jinými zdroji. Vhodné je tudíž využít akumulace přebytečné elektrické energie, díky které by se odlehčila ES a přebytky by se mohly využít pro období nedostatku elektrické energie nebo momentální potřebu v jiném odvětví. Nyní se pro akumulaci využívají přečerpávací vodní elektrárny, baterie, setrvačníky a další technologie ale každá metoda má své nedostatky.

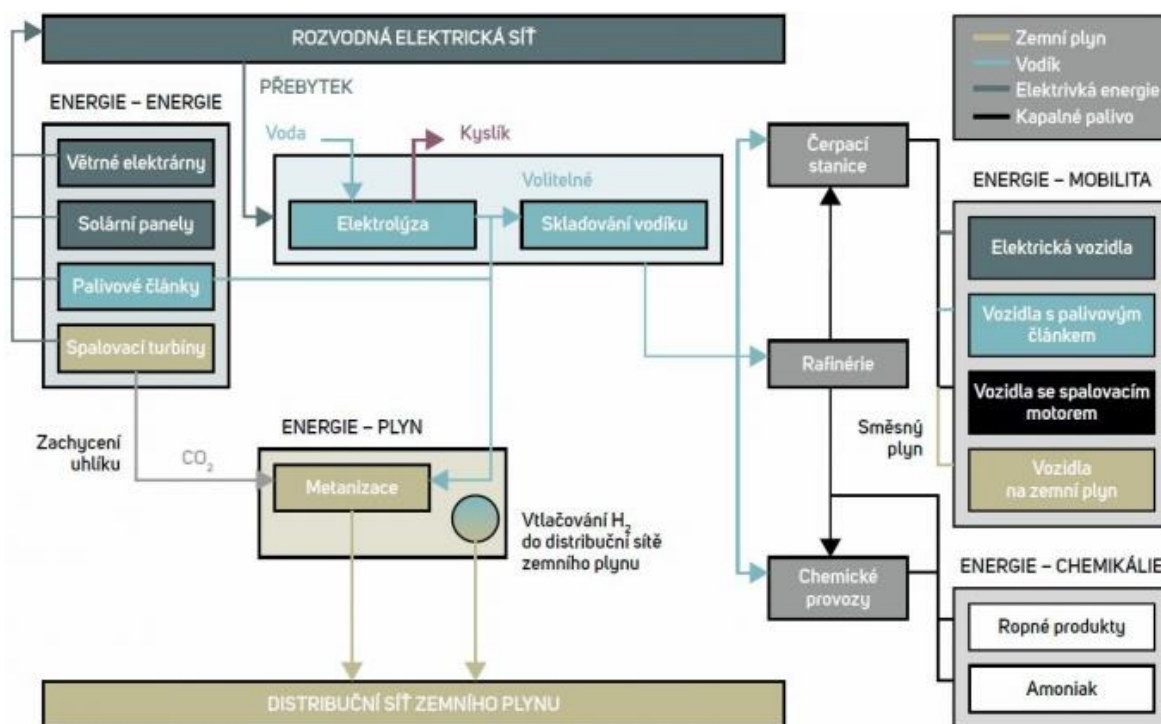
4.1 Princip

Technologie Power-to-gas převádí elektrickou energii na vodík. K přeměně slouží proces zvaný elektrolýza, která z vody pomocí elektrické energie (stejnoseměrného proudu) oddělí kyslík od vodíku a to při nízké nebo vysoké teplotě. Pro větší účinnost lze do vody přidat elektrolyty, které zvýší vodivost vody. Vodík se dále buď uskladní, připojí se k zemnímu plynu v plynovodu, využije jako palivo v průmyslu, kde lze i převést na elektřinu nebo dojde ke spojení s oxidem uhličitým na výrobu metanu.

Při přivedení do plynového potrubí se musí zajistit maximální přimíchání 2 % vodíku do zemního plynu, aby nedošlo k narušení vlastností zemního plynu.

Pokud dojde ke spojení s oxidem uhličitým, vznikne metan, což je syntetický (uměle vytvořený) zemní plyn, značený jako SNG. SNG lze vyvést do plynového potrubí nebo do chemického průmyslu či mobility, jelikož má téměř stejné vlastnosti jako přírodní zemní plyn. SNG lze také převést zpět na elektrickou energii. Vypuštění do plynového potrubí je nejlepším řešením, protože v každé zemi jsou už plynovody zavedeny a jejich síť je velmi rozsáhlá. Plynovody propojují téměř každý kout v zemi, a tudíž je do nich možné akumulovat velké množství energie prostřednictvím plynu. Takhle jednoduše lze propojit Evropu a využívat přebytky kdekoliv. Tato možnost je vhodná hlavně pro SRN, které by svou výrobu z farem na severu jednoduše přivedlo prostřednictvím plynu na jih ke spotřebním místům. Než se tato technologie zavede je potřeba provést další výzkumy pro

zvýšení účinnosti, a proto jsou už některá zkušebních výrobní místa v SRN zavedena. Stejně jsou na tom i v Itálii, Holandsku, Francii a Velké Británii. SRN má možnost v plynovém potrubí akumulovat až 200 TWh energie, což by dokázalo pokrýt až měsíční SRN spotřebu. Oproti tomu v přečerpávacích elektrárnách lze akumulovat jen 40 GWh. [25]



4.1. Přeměna elektrické energie na vodík a jeho další využití [27]

4.2 Typy elektrolýz

Alkalická elektrolýza

Jedná se o nízkoteplotní elektrolýzu pracující při teplotě 70 - 80 °C, která obsahuje kapalný elektrolyt. Katoda je tvořena ocelí a anoda niklem nebo jen poniklováním. Tento typ elektrolýzy je už delší dobu využíván a jeho hlavní výhodou je nízká počáteční investice 800 - 1500 Eur/kW a robustnost. Spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku je 4 - 5 kWh/Nm³ a účinnost má 67 - 82 %. Nevýhodou tvoří pomalý náběh za studena na provozní teplotu, což snižuje flexibilitu, a tudíž není vhodná ke spojení s ES.

PEM elektrolýza

Elektrolýza s polymerním membránovým elektrolytem (PEM) se vyznačuje dosažením provozní teploty v mnohem kratším čase než alkalická. Pracuje také při 80 °C, ale má velmi rychlou odezvu, a tudíž velmi dobře reaguje na změnu výroby elektrické

energie z obnovitelných zdrojů a lze jí tedy připojit k elektrizační soustavě. Spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku je 4 - 8 kWh/Nm³. Její účinnost je 44 – 86 %. Hlavní nevýhodou je vysoká cena 2000 - 6000 Eur/kW. [25] [26]

Vysokoteplotní elektrolýza

Tato elektrolýza je z těchto tří zatím nejméně prozkoumána, a proto se zatím moc nepoužívá. Hlavním důvodem je vysoká provozní teplota (600 - 1000 °C) a uvnitř použité materiály. Jelikož využívá velmi vysoké teploty, tak má malou flexibilitu, ale zase má vlastnosti, kterými převyšuje obě předchozí metody. Hlavní výhodou je vysoká účinnost, která je dána nižší spotřebou elektrické energie a menšími ztrátami při tak vysoké teplotě. Při ní zároveň není potřeba používat katalyzátory, které jinak urychlují chemickou reakci. Tímto procesem lze provádět, jak elektrolýzu, tak i jeho opačnou chemickou reakci, tudíž přeměňovat vodík s kyslíkem na energii elektrickou. Na katodě, která je vyrobená na bázi niklu, dochází k redukčním dějům, což znamená, že z přicházející vody (H₂O) uvolňuje vodík (H₂). Na anodě vytvořené například z oxidu manganu s příměsí lanthanu dochází k oxidačním dějům a tedy k uvolnění kyslíku (O₂) z vody. [27]

4.3 Přeměna energie

Přeměna elektrické energie na vodík se provádí s účinností kolem 80 %. Následná přeměna vodíku spojeného s oxidem uhličitým, čímž vznikne metan, má účinnost opět kolem 80 %, což dělá výslednou účinnost 60 - 70 %. Pokud proběhne přeměna metanu zpět na elektrickou energii, bude celková účinnost okolo 40 %. Aby se zvýšila účinnost na co nejvyšší hodnotu, než se začne Power-to-gas využívat naplno, provádí se neustálý výzkum a vytváří se zkušební přeměny. [26]

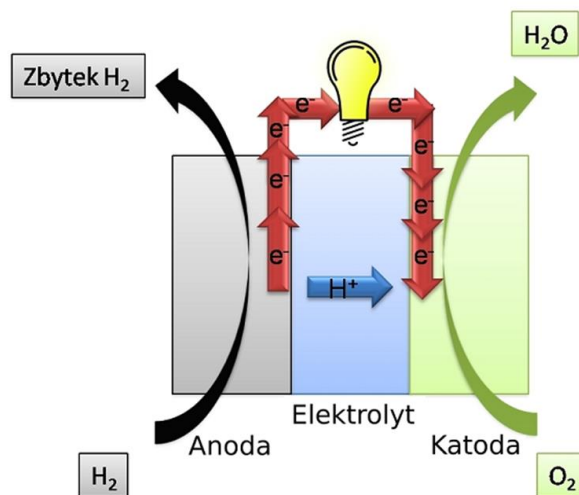
4.4 Vodík

Vodík začíná být velmi perspektivní z důvodu jeho výroby z obnovitelných zdrojů a také tím, že jeho přeměnou nevznikají škodlivé emise. Proto je vodík jako palivo velmi vhodné k využití v dopravě kvůli celkovému snížení emisí. Vodík je zde ale nutné převést na elektrickou energii, k čemuž slouží palivové články. Dále je možno ho využít v průmyslu nebo přidat do plynovodu.

Palivový článek

Slouží pro přeměnu chemické energie na energii elektrickou pomocí chemické reakce. Chemická energie potřebuje k sobě ještě oxidační činidlo, tudíž v našem případě se jedná o vodík (H_2) s kyslíkem (O_2). Palivový článek je složen z anody a katody, které obsahují katalyzátor (anoda = platinu nebo ruthenium, katoda = platinu) a elektrolyt nebo membránu. Na anodu připojený vodík je katalyzátorem rozložen na protony a elektrony. Membrána či elektrolyt, který je mezi katodou a anodou, je schopný propustit jen protony, tudíž zbylé elektrony jdou jinou cestou a přicházejí také k anodě. Samostatně putující elektrony jdou vnější cestou, kde tvoří proud a tím i elektrický obvod. Na katodu přichází kyslík, který se díky katalyzátorům spojí s přicházejícími protony a elektrony. Při jejich spojení dojde k chemické reakci, která vytvoří vodu a teplo.

Elektrická energie je tvořena palivovými články s účinností 40-60 %, pokud by se využilo i vyprodukované teplo při chemické reakci, byla by účinnost až 90 %. Nevýhodou jsou použité drahé kovy jako katalyzátory, protože ionty obyčejných kovů by narušily membránu a obaly palivových článku. Obaly musí být pevné a odolné vůči korozi z důvodu přítomnosti vody. Výstupní proud z palivového článku je stejnosměrný. [28]



4.2. Palivový článek - přeměna vodíku s kyslíkem na elektrickou energii [28]

Skladování vodíku v plynné formě

U plynné formy se využívají lahve vyrobené z nízkouhlíkových nebo legovaných chrom-molybdenových ocelí a z kompozitu. Kompozitní se používají u dopravy a jejich vnitřek je potažen tenkou vrstvou kovu nebo speciálním polymerem. Objem lahví je maximálně 300 litrů a vodík je v nich stlačen kompresory. Technologický potenciál

tlakových lahví je téměř vyčerpán, tudíž pro uskladnění většího množství energie v plynném stavu je nutné lahve propojit. [29]

Dalšími možnostmi skladování jsou vytěžené solné doly či jeskyně zemního plynu. V těchto místech se využívá tlak maximálně okolo 11 MPa. Při vyšším tlaku by mohlo dojít k úniku vodíku. [29] [30]

Skladování vodíku v kapalném formě

V kapalném stavu se musí vodík uchovávat při teplotě -253 °C , tudíž je problém se skladováním, což je spojeno s energetickou i finanční náročností. Je potřeba zajistit nezvyšování tlaku v nádobě. Pro zkapalnění se využije 40 % energie z celkové uskladněné. Pro uskladnění se používají několikavrstvé vysokotlaké nádoby či nádrže, které mají velmi dobré izolační vlastnosti. Používají se i tzv. Dewarovy nádoby, které mají dvojitou stěnu a uvnitř vakuum. I tak ale dochází vnějším teplem k odpařování, a tudíž ke zvyšování tlaku. Proto se musí přebytečný tlak upouštět, aby nedošlo k poničení. Vzniklé ztráty jsou kolem 3% za den. Takto vypařený vodík lze zachytávat a dále využívat. [29] [30]

4.5 Metan

Syntetický metan má téměř totožné vlastnosti jako přírodní. Lze ho tudíž přivést do plynovodu nebo ho využít v průmyslu například ve sklářství, keramice a mobilitě, kde je potřeba čistý metan. Zemní plyn v plynovodech je poté vhodný na výrobu elektřiny a tepla v elektrárnách nebo pro přívod do domů. Jelikož se vytváří z vodíku, snižuje se opět účinnost přeměny. Pro výrobu metanu je potřeba oxid uhličitý, ten není potřeba vyrábět, ale lze ho odebírat jako odpad z různých výroben jako například z elektráren bioplynových a na fosilní paliva, výroby betonu a oceli, pivovarů, při zplyňování biomasy či odpadních plynů. Tím bychom zároveň snížili vyprodukované emise těchto výroben. [31]

4.5.1 Výroba metanu

Metan vzniká tzv. Sabatierovou reakcí, která vzniká při spojení vodíku (80 %) a oxidu uhličitého (20 %) při vysokých teplotách $250 - 700\text{ °C}$ a tlaku. Reakce nastává mezi niklovým katalyzátorem a oxidem hlinitým jako stabilizátorem, což vede ke vzniku metanu, vody a tepla. Pro větší efektivitu je vhodnější použít jako katalyzátor ruthenium.



CO_2 = oxid uhličitý; 4H_2 = 4 molekuly vodíku; CH_4 = metan; $2\text{H}_2\text{O}$ = 2 molekuly vody [32] [33]

Účinnost přeměny elektřiny až po plyn (metan) je okolo 50 - 60 %. Výsledný plyn je složen (po odstranění vody) z 90 % z metanu, 5 % z oxidu uhličitého a 5 % z vodíku. Na výrobu 1 tuny syntetického metanu (SNG) je potřeba 2,7 tuny oxidu uhličitého (1400 Nm^3) a 0,5 tuny vodíku (5600 Nm^3). Při této výrobě dojde ke vzniku 2,2 tuny vody. [33]

4.5.2 Uskladnění metanu

Pro uskladnění se využívají buď plynovody nebo zásobníky. Zásobníky jsou dva typy porézni a kavernové. V ČR je průměrná spotřeba plynu za rok 8 miliard m^3 a v podzemních zásobnících je uloženo okolo 2,93 miliard m^3 .

1) Porézni

Využívá se míst, odkud se vytěžila ropa a zemní plyn. Plyn je pomocí kompresorů stlačován a potrubím ukládán do podzemních pórů a trhlin. Využívají se též i Aquafery, jedná se o podzemní zásoby vody. Voda se tlakem vytlačí do větších hloubek, a tím se uvolní místo pro stlačený plyn.

2) Kavernové

Využívají se velká uměle vytvořená místa, vzniklá těžbou soli nebo uhlí, kde je možno snadno uložit velké množství energie. [34]

4.5.3 Přeměna zemního plynu na elektrickou energii

Nejvhodnější je využívání paroplynné elektrárny. Uvnitř je kompresor zajišťující stlačování vzduchu na vysoký tlak a spolu se zemním plynem (nebo topným olejem) ho vhání do spalovny. Ze spalovny vycházejí spaliny, které mají teplotu 800 - 1450 °C. Ty roztáčejí turbínu a pomocí generátoru dochází k první výrobě elektřiny. Spaliny mají teplotu ještě 400 - 700 °C, dojde k jejich přehřání, aby se zvýšila účinnost, a vytvoří ještě jednu práci a to, že ohřejí vodu na vysokou teplotu a tlak, tudíž dojde k přeměně na páru. Ta provede roztočení další turbíny, která pohání generátor, a tak dojde k výrobě druhé elektřiny. Tento typ elektrárny má výhodu v rychlém naběhnutí (do pár minut) a produkovaní velmi nízkého obsahu emisí (oproti uhelným až o 70 % méně a neprodukují popílek). Paroplynné elektrárny jsou sice výhodnější než elektrárny produkující mnohem

více emisí, ale jelikož je zemního plynu nedostatek a je drahý, využívají se proto pouze jako záložní zdroj. Jejich účinnost 42 - 58 %. [35]

4.5.4 Převoz metanu

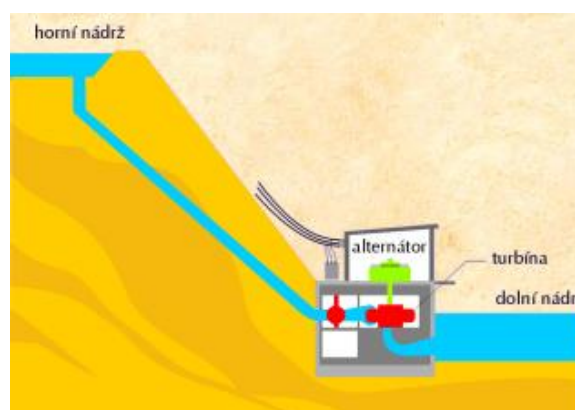
Metan se převáží především LNG tankery, které jsou specializované pro převoz plynu. Převáží se jimi kolem 20 % celkové světové těžby v kapalném stavu v kulových kryogenických zásobnících. Kapalným plynem se poté ukládá do nadzemních ale převážně podzemních zásobníků. Z těch se vypařuje plyn, který lze využít i jako palivo pro LNG tankery. [52]

5 Další technologické možnosti akumulace

Možnosti akumulace jsou velké. Lze akumulovat například do vody, vzduchu, plynu, tepla, chemických látek a podobně. To dává možnost vybrat si tu nejvhodnější akumulaci podle účinnosti přeměny, ceny, množství naakumulované energie, metody akumulace a mnoho dalších parametrů. Uvádím možnosti, jak lze efektivně akumulovat.

5.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Tato metoda obsahuje dvě nádrže, kde jedna je o desítky až stovky metrů výše. Pro akumulaci přebytku elektrické energie se tato energie spotřebovává čerpadlem, které vytlačuje vodu do horní nádrže. V době nedostatku (v ČR ve většině případů pro pokrytí špiček denního zatížení) se načerpaná voda v horní nádrži spustí potrubím na turbínu, kterou roztáčí a generátor vytváří elektrickou energii.



5.1. Přečerpávací vodní elektrárna [39]

Typy použitých turbín jsou Kaplanova, Francisova (přetlakové) a Peltonova (rovnotlaká). Nejpoužívanější je Francisova turbína, která je reverzní, tudíž lze použít i pro čerpání a je vhodná pro spády 50 - 800 m. Dále je Kaplanova vhodná pro spády 10 - 80 m. Pro největší spády a to až 2 km se využívá turbína Peltonova.

Pokud se využívá pouze generátorový režim (bez čerpání vody do horní nádrže) je účinnost kolem 75 %.

Pro výpočet výkonu elektrárny se využívá vztah:

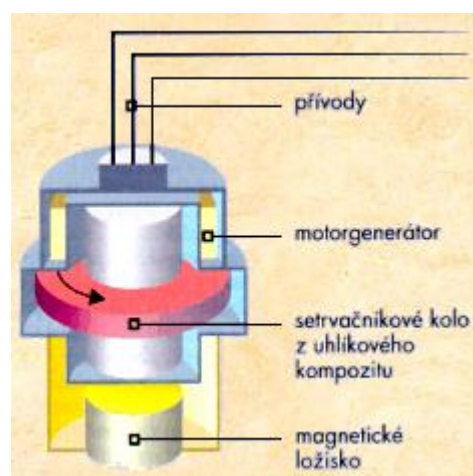
$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (8)$$

P = výkon (W); Q = průtok turbínou (m^3/s); ρ = hustota vody (kg/m^3); g = tíhové zrychlení (m/s^2); H = střední spád (m) [36]

5.2 Setrvačnickové akumulátory

Setrvačnický může sloužit jako záložní zdroj pro dodávání elektrické energie v době výpadku, než dojde k naskočení záložního generátoru nebo v průmyslu či při výzkumu. Pokus byl i u trolejbusu, který díky nabitému setrvačnicku mohl dojet až 2 km. Problémem bylo, že setrvačnick potřebuje, aby byl v rovnovážné poloze (bez pohybu).

Princip je takový, že setrvačnick obsahuje elektromagnety, rotor z kovu (nízko otáčkové) či jiného materiálu například kompozit (vysoko otáčkové) a je obklopen vakuum nebo héliem. Vlivem působení elektromagnetického pole na rotor dojde k jeho roztočení, poté se elektromagnety odpojí od elektřiny, ale rotor se točí dále setrvačností. Aby byla naakumulovaná energie co nejvyšší, je potřeba, aby byl rotor co nejtěžší a roztočen na co nejvyšší otáčky. Největší setrvačnick mají rotor o hmotnosti několik set kilogramů a otáčí se rychlostí až deset tisíc otáček za minutu, vysoko rychlostní jsou lehčí a otáčí se rychlostí až 100 tisíc otáček za minutu. Kvůli tomu je technologie i údržba velmi náročná.



5.2. Setrvačnick [39]

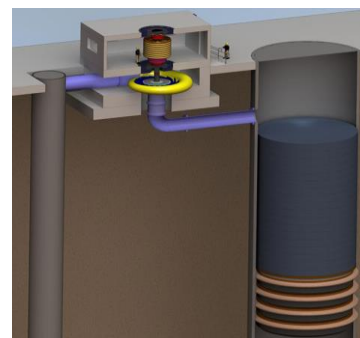
Některé modely mají i odběr tvořen pomocí elektromagnetů a jejich dodávání elektřiny je velmi rychlé (v řádech ms). Ale některé modely jsou vytvořeny tak, že mají hřídel generátoru zavedenou dovnitř a na konci mají magnetický spojkový disk, který je i na konci rotoru setrvačnicku. Při odebírání elektřiny ze setrvačnicku se musí hřídel roztočit na otáčky rotoru, poté dojde ke spojení magnetickými spojkovými disky a setrvačnick začne fungovat jako generátor. Ty dokáží dodávat elektrickou energii sice jen krátký čas, ale o velkém výkonu. Komerčně používaný nejvýkonnější setrvačnick dokáže dodat 1,6 MW po dobu 10 s. Pracují s účinností až 80 %. [37]

5.3 Gravitační úložiště

Metoda využívá dvě šachty, kde jedna má mnohem větší průměr a obsahuje závaží (nejčastěji beton). Šachty jsou na dně i na povrchu propojeny. Přebytky elektrické energie se využívají pro načerpání vody pod závaží, kde vzniká tlak. Čím výše je závaží, tím více je naakumulováno energie. Při potřebě elektřiny se užší šachta otevře, tudíž začne závaží

gravitací vytlačovat užší šachtou vodu, která je pod tlakem a průchozí voda začne roztáčet turbínu. Turbína je napojena na generátor a dochází k výrobě elektřiny.

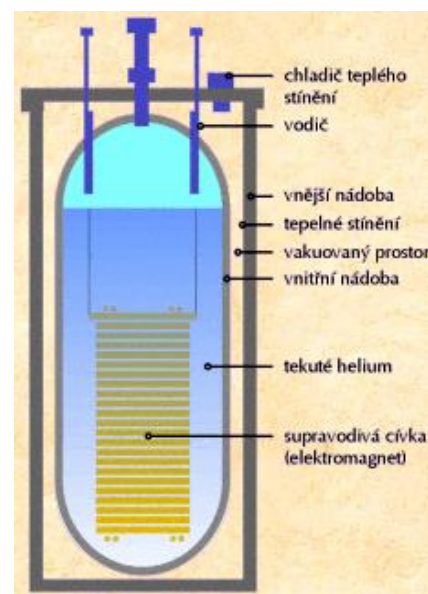
Metoda pracuje s účinností 75 - 80 % a na ploše 150 x 150 m lze dosáhnout při propojení více šachet až 2 GWh. Tato metoda by mohla nahradit přečerpávací elektrárny. Jelikož je v podzemí, tak by neničila krajinu. Zabere mnohem méně místa a lze ji postavit téměř kdekoliv. Nevýhodou ale jsou o 50 % větší náklady na výstavbu. [38]



5.3. Gravitační úložiště [38]

5.4 Supravodivé indukční akumulátory

Jedná se o nejefektivnější ukládání elektrické energie. K akumulaci slouží cívka, vyrobená je buď z olova, cínu, india, nebo rtuti a je obklopena kryogenní látkou například kapalným heliem, které jí chladí a tím se ztráty v cívce snižují téměř na nulu. Do cívky je přivedena elektrická energie, a tudíž dojde k vytvoření magnetického pole. Po odpojení napájení cívka uchová energii v magnetickém poli, protože v ní nedochází ke ztrátám. K cívce je připojen střídač, usměrňovač, k chladicímu médiu chladič a tato zařízení už spotřebu mají, tudíž je celková účinnost kolem 95 %. Lze v ní uchovat energii na neomezeně dlouho dobu.



5.4. Supravodivá cívka [39]

Cívka má velmi nízké ztráty, jelikož při určité teplotě cca $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ se začnou elektrony párovat (tzv. Cooperovy páry) a obsadí jen jeden kvantový stav. Tudíž se mohou elektrony pohybovat materiálem, aniž by jim něco vytvářelo odpor a mohou tvořit magnetické pole.

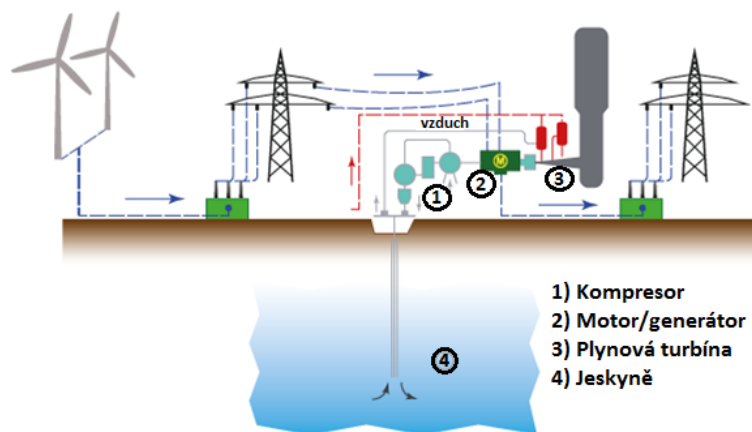
Probíhají výzkumy na cívce s kryogenní látkou ve formě kapalného helia. Cívka může dodávat energii až 1 MW a dochází na ní ke ztrátám energie 0,3 kWh za 1 den. Při větším poklesu napětí v síti, dojde k odebrání energie z cívky do 0,2 mikrosekundy.

Tato technologie podle předpokladů může dosáhnout výkonu až 4 GW. Cívka s héliem by se uložila do země. Materiál cívky by mohl být i z masivní mědi. To by mohlo nahradit přečerpávací vodní elektrárnu a mít i mnohem větší účinnost přeměny. [39] [40]

5.5 Akumulace do stlačeného vzduchu (CAES)

Tato technologie využívá přebytky elektrické energie pro napájení kompresoru, který stlačuje vzduch a při tom vzniká teplo. Stlačený vzduch se ukládá do důlních prostorů, solních jeskyní či artézských studní, které slouží jako podzemní zásobníky. Vzniklé teplo se nejprve odvádělo pryč. Stlačený vzduch se využíval v parních turbínách, kde musel mít určitou teplotu, tu ale ztratil, tudíž se musel přehřát pomocí spalín ze zemního plynu, což snížilo účinnost pod 50 %. A tak se začalo teplo vznikající při stlačování vzduchu odebírat a uskladňovat. Stlačený vzduch se před použitím v turbíně, která je připojena na generátor a vyrábí elektřinu, přehřál tímto uskladněným teplem a to zvýšilo účinnost na 70 %.

Začaly se využívat i umělé zásobníky jako například balóny, které se umísťují na dno jezer a moří, kam se přivede stlačený vzduch a při odebírání se využívá tlaku vody, který vzduch z balónů vytlačí a ten putuje potrubím na povrch. Tato metoda je využita v Kanadě na jezeře, kde jsou balóny uloženy v hloubce 55 m a kapacita balónů je 660 kWh. [41] [42]



5.5. Akumulace stlačeného vzduchu do podzemí [45]

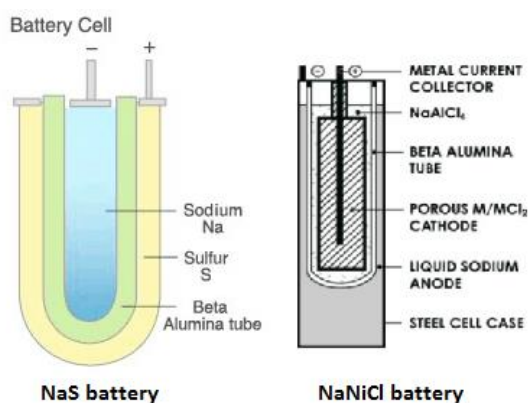
5.6 Sodíkové baterie

Jsou dva typy, jeden je složení sodík-síra (NaS) a druhý sodík-nikl-chlorid (NaNiCl). Rozdíl oproti obyčejným bateriím je ten, že elektrody jsou v kapalném stavu a že pracují při vysoké teplotě (270-350 °C).

Sodík-sírová baterie má kladnou elektrodu tvořenou sodíkem a zápornou sírou. Jako elektrolyt je zde použit materiál beta-oxid hlinitý. Při odebírání energie z baterie záporná elektroda (sodík) začne oxidovat a dojde k tvorbě oxidu sodného, který se na hranici elektrody a elektrolytu rozpadne na záporné ionty e^- (elektrony) a kladné ionty sodíku Na^+ . Přes elektrolyt na kladnou elektrodu dokáží projít pouze kladné ionty, které na ní způsobí spojením se sírou vznik sulfidu sodného (Na_2S_5). Jelikož by sodík při spojení s vodou způsobil hoření, je nutné, aby byla baterie co nejlépe uzavřena a obklopena pískem, aby uhasila případný oheň. Momentální hustota energie je kolem 170 Wh/kg, ale dochází k jejímu vylepšování a teoretické předpoklady jsou mnohem vyšší více než čtyřnásobné. Je schopna vydržet až 4500 nabíjecích/vybíjecích cyklů. Obvykle se tyto baterie provozují ve spojení 5 článků a každý dokáže akumulovat 50 kW. Při paralelním spojení by se kapacita mohla zvýšit až na MW.

Největší baterie v provozu dodává 4 MW až 8 hodin. Tyto baterie mohou sloužit pro zálohu nebo jako stabilizátor sítě.

U **baterie sodík-nikl-chlorid** dochází při nabíjení k přeměně soli $NaCl$ a niklu Ni na nikl-chlorid $NiCl_2$ (katoda) a roztavený sodík Na (anoda). Při vybíjení dojde k přeměně roztaveného sodíku a nikl-chloridu na sůl $NaCl$ a samotného niklu Ni . Elektrolyt je tvořen keramikou, která propustí pouze kladné ionty sodíku. K chemické reakci dojde pouze v případě, že je vnější obvod uzavřen, a tudíž je možný tok elektronů z anody do katody (vznik proudu). Baterie je uzavřena proti vniknutí vody a vzduchu. Její akumulací schopnost je 20 kWh. [46]



5.6. Sodíkové baterie [46]

5.7 Průtokové baterie

Jedná se o baterii typu vanadium redoxní, zinko-bromidová či bromid sodná. Baterie se skládá z dvou nádrží, dvou čerpadel a reaktoru s elektrodami. Jedna nádrž obsahuje pozitivní a druhá negativní elektrolyt. Tím, že jsou elektrolyty rozděleny, tak nedochází k jejich degradaci, tudíž není baterie omezená nabíjecími a vybíjecími cykly. Nádrže jsou propojeny s čerpadly, které vhání elektrolyt do reaktoru. Na něm jsou připojeny elektrody anoda a katoda, k nimž je přivedena elektřina. Uvnitř reaktoru je iontoměničová membrána, přes kterou probíhá chemická reakce. To, jak velký výkon budou vyrábět, závisí na velikosti reaktoru. Jak velký výkon lze akumulovat závisí ale na velikosti nádrží. Jednou z nevýhod je membrána, která má omezený počet nabíjecích cyklů, ale lze jí jednoduše vyměnit. Další nevýhodou je malá obvykle vyráběná energie 15-25 kWh/m³. Výhody jsou v neomezenosti vybíjecích/nabíjecích cyklů a snadno rozšiřitelné nádrže pro větší akumulovaný výkon. Přeměna dosahuje účinnosti 75-85 %.

Vanadium redoxní (vanadiové soli rozpuštěné v elektrolytu) baterie ESP250 dosahují akumulace až 1 MWh a výstupní výkon tvoří 250 kW. [43]

5.8 Superkondenzátory

Superkondenzátor má vlastnosti jak kondenzátoru, tak i baterie. Jako kondenzátor přijímá elektrický náboj, ale jako baterie má konstrukci a obsahuje i uvnitř elektrolyt. Elektrolyt je tvořen buď na bázi vody, nebo organickým rozpouštědlem, který neobsahuje vodu. Superkondenzátory s vodným elektrolytem mají napětí 1-1,2 V a s organickým rozpouštědlem 2,5-3 V. Pokud bychom chtěli získat větší napětí, je potřeba sériové řazení. Elektrody jsou tvořeny hliníkovou fólií s tenkou vrstvou uhlíku (poměr plochy a hmotnosti 2000 m²/g). Výhodou je téměř neomezené množství nabíjecích/vybíjecích cyklů. Mají velmi rychlou akumulaci i výdej energie, ale dochází u nich k samovybíjení. Velikost akumulované energie závisí na napětí. Jejich účinnost je až 95 %. [44] [45]

Závěr

Tato práce rozebírá problematiku týkající se přenosu vyrobené elektrické energie z větrných elektráren (parků) a následně také řešení této problematiky. V práci je popsán zejména přenos energie ze severu Německa a to z důvodu, že tamní výroba ovlivňuje elektrizační soustavu České republiky. Velké toky ze severu způsobují přetěžování vedení a tudíž narušení spolehlivosti a kvality dodávané energie spotřebitelům. Dochází ke kolísání napětí a frekvence, což vede k nutnosti jejich regulace. Napětí je závislé na jalovém výkonu, kterého bylo z počátku nedostatek. V dnešní době, kdy je výroba mnohem větší, dochází k přebytkům jalového výkonu, a tudíž je ideální ho řídit a regulovat s ním napětí již v pilotních uzlech, k čemuž slouží systém ASRU. Stabilita frekvence je závislá na činném výkonu, který lze řídit pomocí regulace turbíny větrné elektrárny nebo pomocí PST transformátorů. Ty umožňují regulaci změnou úhlu napětí. PST transformátory jsou instalovány na hranicích České republiky s Německem, čímž chrání naši elektrizační síť. Velké toky energie v Německu ale přetrvávají a přetěžují tamní vedení.

Z toho důvodu se staví HVDC vedení, která propojí sever Německa s jihem, kde dochází k velké spotřebě elektrické energie. Dále je tímto vedením možno propojit různé země nebo zásobovat energií velmi vzdálené ropné plošiny či doly. Vedení lze stavět podzemní, nadzemní nebo dokonce i podmořské. Pomocí HVDC vedení lze přenášet velmi velké výkony (při zachování velmi nízkých ztrát) na velké vzdálenosti (stovky až tisíce km). Pro tento přenos lze využívat i stávající střídavá vedení, protože pro stejnosměrný přenos stačí dva, někdy i jen jeden (při zpětném zemním spojení) vodič. Vedení HVDC je navíc mnohem levnější než AC, ale nevýhodou je nutnost instalace měničny na začátcích, koncích a odbočkách vedení, což je velmi nákladné.

Další kapitolou je shrnuta technologie Power-to-gas, která slouží pro akumulaci přebytků elektrické energie. Pracuje na principu přeměny elektřiny na vodík a případně i na syntetický zemní plyn (SNG), který má téměř stejné vlastnosti jako přírodní zemní plyn. Zajímavostí této technologie je možnost začlenění SNG (případně i vodíku) do plynové infrastruktury, která bývá v každé zemi rozvinutá a dokáže pojmout velké množství energie. Začleněný SNG se využívá pro přímé spalování (př. vytápění, paroplynné

elektrárny), ale vodík lze přeměnit na elektrickou energii v palivových článcích. Jelikož je při výrobě SNG potřeba oxid uhličitý, dochází zároveň ke snižování emisí.

Doposud nejvyužívanější akumulací metodou jsou přečerpávací vodní elektrárny, které jsou využívány především z důvodu velké akumulací kapacity. Problémem je téměř vyčerpané množství lokalit pro jejich umístění a také jejich vysoká cena. Další zajímavou velkokapacitní akumulací je technologie gravitačního úložiště a technologie do stlačeného vzduchu. Druhá jmenovaná stlačuje vzduch do prostorů po těžbě, podzemních zásob vody nebo do umělých zásobníků, umístěných na dně jezer či moří. Pro činnost gravitační technologie je sice třeba vystavět podzemní šachty, které zaujímají velkou plochu, avšak žádným způsobem nenaruší estetiku krajiny. Velmi atraktivní technologií je dle mého názoru možnost supravodivé indukční akumulace, která je téměř bezztrátová a je schopna rychlého dodání energie. Pro velkokapacitní úschovu energie je bohužel tato technologie zatím ve vývoji. Vyčnívající možností je pak také akumulace do superkondenzátorů, která se vyznačuje rychlým nabíjením i rychlým odevzdáním energie. Jejich nevýhodou je samovybíjení a malá akumulací kapacita.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049372.
- [2] MOTLÍK, Jan, Libor ŠAMÁNEK, Josef ŠTEKL, et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice: Studie analyzuje současný stav a předpoklady rozvoje v dlouhodobějším horizontu*. ČEZ, a.s. Duhová 2/1444, Praha, 2007.
- [3] Funkce a technika, Z čeho se skládá, Systémy regulace. *W.E.B větrná energie* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetna-energie_9/
- [4] Rotor, Gondola, Stožár, Základ. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1, 2013 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/z-ceho-se-sklada-vetna-elektrarna/82>
- [5] Nové české PST transformátory regulují toky elektrické energie z Německa. *Volty.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.volty.cz/2017/01/18/nove-ceske-pst-transformatory-reguluji-toky-elektricke-energie-z-nemecka/>
- [6] HROZEK, Dian. Norsko jako baterie Evropy? - 1. část. *OENERGETICE.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/norsko-jako-baterie-evropy-1-cast/>
- [7] *Elektrarny2-cast11-v1: Řízení elektrizační soustavy*. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf>
- [8] HABRYCH, Richard. *Systém regulace napětí a jalových výkonů v DS*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] *Pravidla provozování lokálních distribučních soustav: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele lokální distribuční soustavy* [online]. Provozovatel lokálních distribučních soustav Coal Services [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.czechcoal.cz/cz/elektrina/lds/doc/PRILOHA_4_PPLDS_CS.pdf
- [10] HABRYCH, Richard. Velkoodběratelé s vnořenou výrobou elektřiny. *ENERGETIKA: Distribuční soustava*. ČSZE, IČO: 18631584, 2016, **66**(4), 252-256.
- [11] HABRYCH, Richard. Vliv zahraničních větrných elektráren na přenosovou soustavu České republiky. *ENERGETIKA: Přenos a distribuce elektřiny*. ČSZE, IČO: 18631584, 2013, **63**(3), 159-163.

- [12] HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu synchronního generátoru. *ENERGETIKA: Řízení jalového výkonu*. ČSZE, IČO: 18631584, 2015, **65**(3), 146-152.
- [13] HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. *ENERGETIKA: Regulace napětí*. ČSZE, IČO: 18631584, 2015, **65**(5), 265-271.
- [14] HABRYCH, Richard. *Architektura centralizovaných systémů Automatické sekundární regulace napětí používaná v DS 110KV*.
- [15] HVDC - stejnosměrný přenos elektrické energie. MAJLING, Eduard. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>
- [16] Větrné elektrárny VIII. – Mořské (offshore) větrné elektrárny. KOČ, Břetislav. *Tzbinfo* [online]. 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>
- [17] Statoil postaví plovoucí větrnou elektrárnu u Skotska. *E15.cz* [online]. Statoil, 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/statoil-postavi-plovouci-vetrnou-elektrarnu-u-skotska-1242039>
- [18] Siemens kvůli větrným elektrárnám na moři buduje flotilu lodí. DOHNAL, Radomír. *HYBRID.CZ* [online]. Siemens, 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/siemens-kvuli-vetrnym-elektrarnam-na-mori-buduje-flotilu-lodi>
- [19] CEJNAROVÁ, Andrea, Milan BAUMAN, Vladimír BUKAČ, et al. *Visions: Časopis o lidech, technologiích a inovacích* [online]. Siemens. Logik, 2017 [cit. 2017-06-04]. ISSN 1804-364X. Dostupné z: <http://issuu.com/siemenscz/docs/visions-jaro-2017?e=9246966/47905122>
- [20] HVDC Light (VSC). *ABB* [online]. ABB [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/hvdc-light>
- [21] The Classic HVDC Transmission. *ABB* [online]. ABB [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.abb.com/industries/cz/9AAC30300393.aspx?country=CZ>
- [22] SUEDLINK. *TRANSNET BW* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.transnetbw.de/de/suedlink>
- [23] ABB wins orders of over \$300 million for world's first 1,100 kV UHVDC power link in China. *ABB* [online]. 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/f0f2535bc7672244c1257ff50025264b.aspx>
- [24] GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *GLOBAL WIND REPORT*. 2017. Dostupné také z: <http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf?ref=Website>

- [25] Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny? VOBOŘIL, David. *OENERGETICE.CZ* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny/>
- [26] Zachrání technologie Power to Gas obnovitelné zdroje? SCHINDLER, Jan. *Tzbinfo* [online]. 2014 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oze.tzbinfo.cz/11034-zachrani-technologie-power-to-gas-obnovitelne-zdroje>
- [27] Vysokoteplotní elektrolyza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze. KOLMANOVÁ, Marie. *TECHNICKÝPORTÁL.cz* [online]. VŠCHT Praha, 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodik-u-s-moznostmi-zpetne-konverze_35526.html
- [28] Palivový článek: princip. *Skupina fyziky povrchů* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/povrchy/metoda/afm>
- [29] SKLADOVÁNÍ VODÍKU. *H2 shop* [online]. 2013 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=17>
- [30] ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. ČESKÁ ENERGETICKÁ AGENTURA, 2006. Dostupné také z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>
- [31] GRIMM, Nadia, Stephan HOHMEIER, Jeannette UHLIG, Andreas WEBER a Immo ZOCH. DENA - DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR. *Power to Gas: Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife*. Berlin: trigger.medien.gmbh, 2013. Dostupné také z: http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads_PtG_neu/Fachbroschuer_e_Power_to_Gas_Integration.pdf
- [32] Sabatier reaction. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sabatier_reaction
- [33] Přechod německé energetiky k obnovitelným zdrojům III. NEJEDLÝ, Petr. *IDNES.cz* [online]. 2012 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=298503>
- [34] Zásobníky plynu v České republice. HROZEK, Dian. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/plyn/zasobniky-plynu-v-cr/>
- [35] Paroplynová elektrárna – princip funkce. VOBOŘIL, David. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/TYPY-ELEKTRAREN/PAROPLYNOVA-ELEKTRARNA-PRINCIP-FUNKCE/>

- [36] Přečerpávací vodní elektrárna – princip a uspořádání/. BUDÍN, Jan. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/TYPY-ELEKTRAREN/PRECERPAVACI-VODNI-ELEKTRARNA-PRINCIP-USPORADANI-2/>
- [37] Setrvačník: elektřina uložená v pohybu. *Ekologickébydlení.eu* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ekobydlení.eu/energie/setrvacnik-elektřina-ulozena-v-pohybu>
- [38] GROHMANN, Jan. *Ekologickébydlení.eu* [online]. 2013 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ekobydlení.eu/energie/gravitacni-uloziste-elektricke-energie>
- [39] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. CEZ [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [40] Supravodivost – princip a využití. MOLEK, Tomáš. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti/>
- [41] Velkokapacitní zásobníky spolehlivě uskladní přebytky elektřiny. *TECHNICKÝPORTÁL.cz* [online]. 2006 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/velkokapacitni-zasobniky-spolehlive-uskladni-prebytky-elektřiny_17387.html
- [42] V Kanadě skladují elektřinu na dně jezera. KRUTIŠ, Petr. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektřina/akumulace-energie/v-kanade-skladuji-elektřinu-na-dne-jezera-video/>
- [43] Průtoková baterie. REICHL, Tomáš. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>
- [44] Akumulace elektrické energie. MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a . *Elektro: Časopis pro elektrotechniku* [online]. ČZU Praha [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie-9696>
- [45] Akumulace elektřiny. DVOŘÁK, Petr. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Tzbinfo* [online]. 2011 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oze.tzbinfo.cz/7435-akumulace-elektřiny>
- [46] Sodíkové baterie – konstrukce, princip činnosti a aplikace. REICHL, Tomáš. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektřina/akumulace-energie/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace/>

- [47] MÁČA, Josef. Typy větrných elektráren. *ENERGETIKA: Obnovitelné zdroje energie*. ČSZE, IČO: 18631584, 2013, **63**(3), 168-170.
- [48] Analýza větrné energetiky v ČR: vítr může být šestkrát levnější než jádro. *Ekolist.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/analyza-vetrne-energetiky-v-cr-vitr-muze-byt-sestkrat-levnejsi-nez-jadro>
- [49] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2014-05]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/04.html>
- [50] Zkapalněný zemní plyn. *Wikipedie: Ověřená encyklopedie* [online]. [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zkapaln%C4%9Bn%C3%BD_zemn%C3%AD_plyn